INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

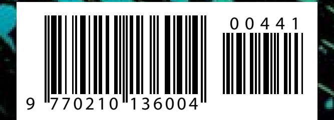
MEDICINA
Avances en reparación de tejidos

MEDIOAMBIENTE
Gestión de reservas marinas

ASTRONÁUTICA
Misiones espaciales de bajo coste

Partículas fantasmales

La naturaleza exótica de los neutrinos amplía los horizontes de la física

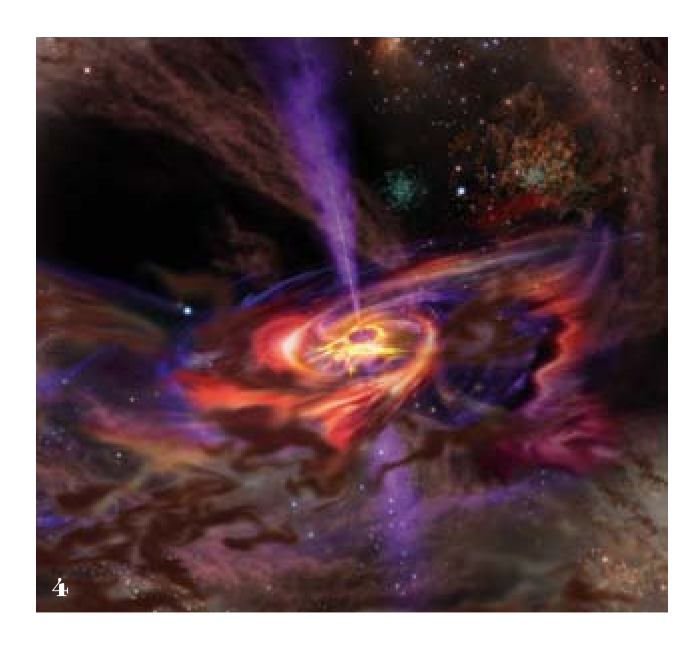


6,50 EUROS

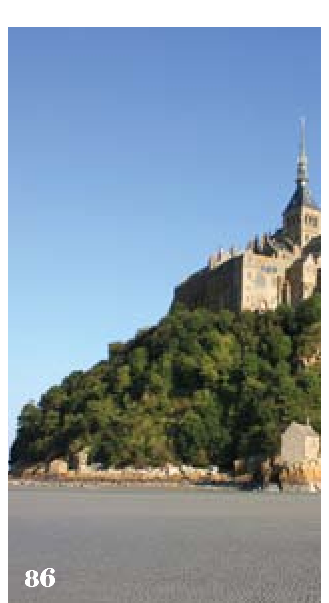


ARTÍCULOS

STEPHEN FRINK, GETTY IMAGES


4


55



86

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Las extrañas propiedades de los neutrinos llevan más de ochenta años asombrando a los físicos. Numerosos experimentos en todo el mundo intentan averiguar los detalles del mecanismo por el cual estas partículas adquieren su exigua masa, así como su enigmática relación con la antimateria. Las respuestas podrían proporcionar pistas clave para ampliar el modelo estándar de la física de partículas. Imagen de Vault49.



redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2013

LOS NOMBRES DEL WOLFRAMIO

En «Creación de una metaloteca» [por Marc Boada; Investigación y Ciencia, febrero de 2013], el autor menciona varias veces el «tungsteno». El elemento 74 de la tabla periódica fue aislado en otoño de 1783 por los hermanos riojanos Fausto y Juan José de Elhuyar, quienes hallaron, en un mineral llamado wolframita, un ácido que coincidía con el «ácido túngstico» predicho, pero no aislado, por Carl W. Scheele. Más tarde describieron su hallazgo en «Análisis químico del wólfram y examen de un nuevo metal que entra en su composición». Es decir, sus descubridores le dieron el nombre de *wólfram*, o wolframio, por lo que creo que debería respetarse.

De hecho, la RAE incluye en su diccionario las voces *wólfram*, *volframio* y *tungsteno*, todas las cuales remiten a *wolframio*. Y su símbolo químico es W, no Tg o algo semejante.

José Antonio Martínez Pons
Doctor en química
y licenciado en física
Madrid

Responde Pascual Román Polo, catedrático de química inorgánica de la Universidad del País Vasco: *En 2005, junto con Pilar Goya, del Instituto de Química Médica del CSIC, publicamos en* Chemistry International *(vol. 27, n.º 4, págs. 26-27) la sugerencia de mantener en inglés los nombres* tungsten *y* wolfram *para el elemento químico de número atómico 74. Ture Damhus, en representación de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), nos respondía que en inglés el único nombre aceptado por la IUPAC era* tungsten*, pero dejaba la puerta abierta a que en otros idiomas se empleasen* tungsteno, wolframio *o sus voces derivadas.*

En castellano el nombre más apropiado es wolframio *por varias razones. El elemento fue aislado por vez primera en 1783 en Vergara (Guipúzcoa) por Juan José y Fausto Delhuyar a partir del mineral wolframita. En la página 88 de su artículo «Analisis quimico del volfram, y exàmen de un nuevo metal, que entra en su composicion; por D. Juan Joséf y D. Fausto de Luyart, de la Real Sociedad Bascongada» (grafía original), publicado ese mismo año, los autores reivindicaban el nombre de* wolframio. *Una práctica común a finales del siglo XVIII era nombrar los elementos químicos a partir del mineral de procedencia; en este caso, el volfram, o wolframita. Los hermanos Delhuyar escribieron: «Daremos á este nuevo metal el nombre de* volfram, *tomándolo del de la materia, de la qual lo hemos sacado, y miraremos ésta como una mina, en que este metal está combinado con el hierro y la alabandina, como queda probado».*

¿Por qué no defender en castellano la voluntad de sus descubridores? Desde hace muchos años, ilustres investigadores españoles han abogado por el uso de wolframio *frente al de* tungsteno. *Por último, el símbolo del elemento reconocido por la IUPAC es W, que, evidentemente, procede de* wolfram *y no de* tungsten.

CEREBRO MULTISENSORIAL

En el artículo sobre el cerebro multisensorial [«Dependencia y cooperación entre los sentidos», por L. D. Rosenblum; Investigación y Ciencia, marzo de 2013] se destaca que «varios estudios de psicología y de neurociencia realizados en los últimos treinta años han revelado que el cerebro es un órgano multisensorial, que conjuga sin cesar los datos que le envían los diversos sentidos». Quizá pueda interesar a los lectores de lengua hispana que los primeros estudios cuantitativos que pusieron al descubierto esa faceta multisensorial de diversas zonas de la corteza cerebral fueron realizados hace más de 60 años por el neurocientífico Justo Gonzalo (Barcelona, 1910 — Madrid, 1986).

Desde 1938, Gonzalo estudió a multitud de pacientes con lesiones cerebrales y caracterizó un síndrome multisensorial de afección bilateral simétrica en sujetos con lesión cortical unilateral. Los fenómenos de interacción multisensorial, como la mejora en la percepción de un estímulo por la presencia de otro de diferente naturaleza, fueron interpretados sobre bases fisiológicas. Gonzalo propuso un sistema de gradientes funcionales a lo largo de la corteza cerebral que daría cuenta del carácter multisensorial de cada una de sus partes, el cual se ajustaba a sus observaciones y a las descritas en la bibliografía. Esta investigación fue publicada por el Instituto Cajal del CSIC en dos volúmenes en 1945 y 1950, así como en 1952 en la revista del centro. A pesar de estar redactados en español, dichos trabajos gozaron en su momento de una notoria acogida internacional.

Esos estudios han sido recopilados en una reciente edición facsímil con suplementos: *Dinámica cerebral* (Justo Gonzalo; Red Temática en Tecnologías de Computación Artificial/Natural, Universidad de Santiago de Compostela, 2010). La versión digital íntegra es de libre acceso y se encuentra disponible en el repositorio electrónico de dicha universidad: dspace.usc.es/handle/10347/4341.

Isabel Gonzalo Fonrodona
Facultad de ciencias físicas
Universidad Complutense de Madrid



Marzo 2013

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



ASTRONOMÍA

Destino: el agujero negro del centro de la galaxia

Hace tiempo que los astrónomos sabían que sucedería. En algún momento del verano —tal vez este mismo mes—, una gran nube de gas y polvo se adentrará en la región central de la Vía Láctea, donde habita un agujero negro supermasivo de cuatro millones de masas solares. Se cree que la nube podría incluso albergar una estrella joven en su interior.

El espectáculo que se avecina debería revelar todo tipo de información sobre el misterioso núcleo galáctico, una zona difícil de estudiar debido a la gran cantidad de polvo que la rodea y la enorme distancia a la que se encuentra. Los expertos llevan tiempo preguntándose por qué, a diferencia de lo que ocurre con los agujeros negros supermasivos de otras galaxias, el de la Vía Láctea se muestra tan calmo. No parece engullir la materia circundante al ritmo que cabría esperar.

Por desgracia, la región resulta demasiado minúscula y distante como para analizarla en detalle (piense en algo así como pintar la *Mona Lisa* sobre la superficie de una chincheta, enviarla a la Luna e intentar después estudiar su sonrisa). Las imágenes de la zona se muestran muy borrosas, lo que dificulta entender por qué allí no se producen los estallidos de energía que deberían generarse cuando un objeto cuatro millones de veces más masivo que el Sol devora el gas que lo rodea. Por todo ello, el acontecimiento ha suscitado una gran expectación entre los astrónomos.

«Cuando un meteorito atraviesa la atmósfera terrestre podemos ver cómo se consume debido al rozamiento. Ahora presenciaremos algo similar: la interacción entre la nube y las otras masas de gas que se precipitan en espiral hacia el agujero negro», explica Eliot Quataert, astrofísico de la Universidad de California en Berkeley. El resultado será una gran llamarada cósmica cuyos datos mantendrán ocupados a los astrónomos durante los próximos años.

Los investigadores esperan también averiguar el origen de la nube. Algunos creen que podría haberse formado por la colisión de dos masas de gas cerca del centro galáctico, un suceso que se habría llevado parte del momento que las mantenía en órbita en torno a la estrella. Otros piensan que tal vez se trate de un sistema estelar errante, joven y tenue, cuyo polvo aún no habría tenido tiempo de formar planetas.

Pero, con independencia del origen de la nube, su destino no deja lugar a dudas: antes o después traspasará el horizonte de sucesos del agujero negro y perecerá. Pero, antes de que eso ocurra, los astrónomos la estudiarán con todo detalle. Stefan Gillessen, uno de los miembros del equipo que la descubrió en 2011, quiere ver en ello un aspecto positivo: «Es desdichada en el sentido de que será destruida, pero afortunada en el sentido de que pronto se hará muy famosa».

—Michael Moyer

DON DIXON

ASTROFÍSICA

Nuevos mundos más allá de Plutón

En julio de 2015, la sonda espacial *New Horizons* dejará atrás el mundo más lejano jamás visitado por la NASA: el misterioso Plutón y sus numerosas lunas. Ahora los expertos de la agencia están planeando el futuro de la nave, a la caza de nuevos astros más allá de Plutón a los que la sonda pueda aproximarse.

Plutón es uno de los dos mayores objetos del cinturón de Edgeworth-Kuiper, una región en la que los astrónomos han descubierto unos 1600 cuerpos celestes. La sonda *New Horizons*, sin embargo, no pasará cerca de ninguno de ellos. Dado que lo último que los científicos desean perder es una buena nave espacial, la búsqueda se centra ahora en nuevos objetos más próximos a la trayectoria de la sonda. «Nos alegraría encontrar al menos uno», explica Alex Parker, astrónomo del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. «No digamos ya dos.»

A tal fin, los expertos están empleando telescopios en Hawái y Chile. Se comparan las imágenes tomadas a lo largo de varias noches y se identifican aquellos objetos que se mueven. Hasta el momento, el proyecto ha encontrado docenas de pequeños cuerpos celestes, tres de los cuales estarán a una distancia de entre 15 y 30 millones de kilómetros del itinerario que la sonda recorrerá en 2018. Desde esa distancia, la nave puede buscar satélites naturales, los cuales revelan la masa del cuerpo principal en virtud de su respuesta a la atracción gravitatoria. Parker, sin embargo, desea algo más: objetos que la sonda pueda observar desde una distancia de pocos miles de kilómetros.



La sonda *New Horizons*, en 2006.

Por desgracia, los cuerpos celestes de interés se encuentran ahora en una de las peores regiones del cielo: la constelación de Sagitario, cuya línea de visión desde la Tierra apunta al centro de la Vía Láctea. «Resulta muy difícil vislumbrar objetos pequeños sobre un fondo de miles y miles de estrellas», explica Parker. A pesar de todo, y teniendo en cuenta los astros hallados hasta ahora, Parker se muestra optimista y confía en que, tras dejar atrás Plutón, la sonda continúe atareada durante largo tiempo.

—Ken Croswell

¿QUÉ ES ESTO?



Las rémoras constituyen una familia de ocho especies de peces tropicales que, durante más de un milenio, han inspirado una mitología casi más extraña que esas pequeñas ventosas que poseen. Las rémoras las utilizan para adherirse prácticamente a cualquier cosa, ya sean otros peces, tortugas, submarinistas o barcos, con lo que logran desplazarse sin ningún esfuerzo.

Un grupo de ictiólogos acaba de descubrir de dónde proviene la ventosa de estos peces. En un estudio publicado en el *Journal of Morphology* en diciembre de 2012, describen cómo inyectaron tinte rojo en los huesos de rémoras y otros peces en estado larvario para observar su crecimiento. Durante cierto tiempo, la aleta dorsal y el esqueleto que la soporta parecieron desarrollarse del mismo modo en ambos tipos de peces. Después, los huesos de la aleta dorsal de las rémoras se expandieron y fueron desplazándose hacia la cabeza. Cuando los juveniles habían alcanzado los 30 milímetros de longitud, ya tenían una ventosa perfectamente formada de dos milímetros de diámetro.

—Becky Crew

SCOTT ANDREWS, GETTY IMAGES (*sonda*); NORBERT WU, MINDEN PICTURES (*rémoras*)

ENERGÍA

Tecnología puntera para aprovechar la luz natural

A fin de reducir su consumo energético, la compañía editora del rotativo *The New York Times* decidió hace un tiempo sacar partido del método de iluminación más antiguo que existe: el sol. Sus oficinas centrales, situadas en un rascacielos de 52 plantas, cuentan con enormes ventanales que llegan hasta el techo y con un sistema de sensores electrónicos que regulan la iluminación interior. Según un estudio reciente del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) en el que se analizaban también otros edificios neoyorquinos, la técnica habría permitido a la compañía reducir su consumo eléctrico en un 24 por ciento.

La energía empleada para iluminar, ventilar y aclimatar los edificios urbanos de todo el mundo representa en torno al 40 por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono, el principal responsable del cambio climático. Sin embargo, aunque aprovechar la luz solar pueda parecer una solución obvia para ahorrar energía, ponerla en práctica no resulta tan sencillo.

Entre otras medidas, en un edificio de oficinas como el del *Times* deben instalarse cristales especiales que controlen los reflejos y las sombras, y que bloqueen una parte de la luz solar, a fin de que los empleados puedan trabajar sin molestias en la pantalla del ordenador. También se necesitan lámparas autorregulables duraderas, económicas y fáciles de mantener, así como todo un sistema informático que las controle. Según el informe del LBNL, equipar con todo ello los 20 pisos de oficinas del *Times* supuso la mayor adquisición directa de tecnología puntera en iluminación de todo EE.UU.

Hace ya 35 años que Stephen Selkowitz, reputado experto del LBNL en técnicas de construcción, comenzó a abogar por un mejor aprovechamiento de la luz solar. Hasta ahora, sin embargo, la tendencia ha sido la opuesta. Selkowitz explica que las lecciones aprendidas en un edificio o una urbe no se han extrapolado a otros inmuebles ni a otras ciudades. El rascacielos del *Times* proporciona un buen ejemplo. La empresa ocupa casi la mitad de los 150.000 metros cuadrados de oficinas del edificio, pero no todos los arrendatarios adoptaron la técnica, cuyo precio de instalación puede ascender a entre 20 y 100 dólares por metro cuadrado de oficina.

Con todo, Selkowitz calcula que la inversión ha permitido a la compañía economizar unos 13.000 dólares en electricidad por año y por planta de oficinas. La empresa necesitó tres años para amortizar el gasto, pero desde entonces ha estado ahorrando dinero.

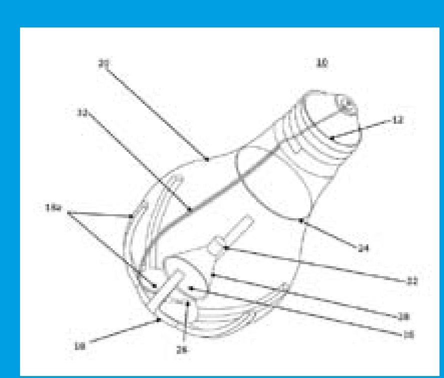
Ahora, debido a la construcción de nuevos edificios al norte y al oeste, la compañía deberá reajustar el sistema informático para evitar el brillo procedente de sus ventanas. Selkowitz reconoce que, aunque parezca fácil, aprovechar de manera eficiente la luz natural no es coser y cantar. *—David Biello*



PATENTES

Bombillas de estado sólido: Los diodos emisores de luz (LED) emplean mucha menos energía que las bombillas incandescentes, su vida útil tal vez llegue a superar algún día los diez años y, a diferencia de los fluorescentes compactos, no contienen mercurio. Sin embargo, adolecen de sus propias desventajas. Para prolongar su vida durante tanto tiempo, los LED necesitan permanecer relativamente fríos. Y si desean reemplazar a las bombillas actuales, deberían emitir luz en todas las direcciones. Un buen número de los que se comercializan en la actualidad no lo hacen, sino que radian en una sola dirección, como una linterna.

En la patente número 8.292.468 de la oficina estadounidense, Nadarajah Narendran, profesor y jefe de investigación del Instituto Politécnico Rensselaer, en Nueva York, y sus coinventores han descrito una bombilla LED que soluciona ambos problemas. «El calentamiento constituye uno de los problemas de los LED, ya que puede echar a perder la larga duración del dispositivo», explica Narendran. Algunas bombillas incluyen un disipador térmico de metal en la base o en su parte trasera, pero ello produce sombras y crea un efecto similar al de una linterna.



El dispositivo de Narendran invierte el diseño habitual. La fuente LED y el disipador térmico se sitúan en la parte frontal de la bombilla, donde la exposición al aire es mayor, lo que revierte en una mejor disipación del calor. Además, las paredes interiores de la bombilla reflejan y refractan la luz de tal modo que su iluminación emula a la de una lámpara incandescente. El resultado es una bombilla de larga duración, pero con una estética muy familiar. «El mundo de la iluminación está transformándose. En muchos casos el aspecto no cambiará —seguirá pareciendo una bombilla—, pero el interior será diferente», concluye Narendran.

—Marissa Fessenden

STEFAN BUNGERT, REDUX PICTURES *(rascacielos)*; CORTESÍA DE LA OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. *(bombilla)*

MEDIOAMBIENTE

Un bosque tropical que agoniza

La Amazonía occidental se halla amenazada por una situación a la que nunca antes se había enfrentado: la combinación de calentamiento climático y del crecimiento de la población humana. En los últimos años, la región ha sufrido dos de esas sequías que solo suceden «una vez por siglo», una en 2005 y otra en 2010. Tales eventos podrían hacerse más frecuentes a medida que aumentan las temperaturas en el Atlántico Norte y los humanos siguen quemando miles de kilómetros cuadrados de selva para convertirlos en cultivos.

La reducción de la superficie forestal conlleva un descenso en las precipitaciones. «El 50 por ciento de la lluvia que cae en la selva amazónica es generada por la propia selva a través de la transpiración y la evaporación», afirma Gregory Asner, ecóloga tropical del Instituto de Ciencia Carnegie de la Universidad Stanford, que presentó sus resultados preliminares sobre el daño causado por la sequía en la región peruana de Ucayali en la reunión de la Unión Geofísica de EE.UU., celebrada en San Francisco el pasado mes de diciembre. «La deforestación exacerba el problema de la sequía, porque elimina ese mecanismo interno.» Desbrozar campos y pastos también deja más expuestos los márgenes del bosque, con lo que su interior se seca y se quema con mayor probabilidad cuando se descontrola un incendio agrícola.

Ante las condiciones más cálidas y secas, las especies pueden aclimatarse y adaptarse... o bien extinguirse. Una especie vegetal puede ampliar su territorio a una región más fría, pero solo a la velocidad que le permite la dispersión de sus semillas, afirma Kenneth Feeley, biólogo de la Universidad Internacional de Florida que estudia los árboles de la vertiente oriental de los Andes peruanos. Le sorprendieron los cambios de distribución acaecidos en solo unos años. «Las especies están ascendiendo a zonas más altas; lo hacen a razón de unos tres metros en vertical al año, una velocidad muy grande», señala, aunque añade que podría no ser suficiente. Teniendo en cuenta el cambio climático que se está produciendo, necesitarían ascender nueve o diez metros al año. En las tierras bajas, la deforestación reduce las áreas a las que pueden trasladarse las especies, mientras que las carreteras y zonas de pastos constituyen barreras para la dispersión. Perú cuenta con algunas zonas protegidas extensas, pero los científicos ignoran si son lo suficientemente grandes o si se hallan en el lugar adecuado para permitir la migración de las especies ante un clima que cambia con rapidez.

Para ayudar a responder a esa cuestión, Asner vuela en un avión equipado con un sistema de captación de imágenes por láser y un espectrómetro que identifica las señales químicas de las plantas con un 80 por ciento de precisión, lo suficiente como para crear un mapa de diversidad de las especies del dosel arbóreo en la zona occidental de la Amazonía, de Colombia a Bolivia. Ello proporcionará información de partida con la que se podrán realizar comparaciones y determinar variaciones futuras. Por su parte, Asner prevé que observará grandes cambios en la configuración básica de la Amazonía durante su vida. «Tengo 44 años. Si tuviese la suerte de llegar a los 80, podría ser testigo de ello.»

—Barbara Fraser



GREGORY G. DIMIJIAN, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*selva*); © MUSEO AMERICANO DE HISTORIA NATURAL DE NUEVA YORK/DENIS FINNIN (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

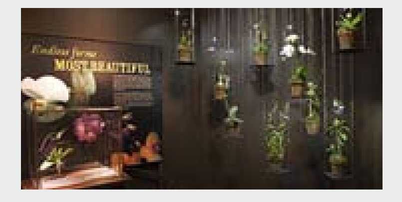
4 de junio
Origen y evolución de la humanidad
Francisco J. Ayala, Universidad de California en Irvine
Fundación Ramón Areces, Madrid
www.fundacionareces.es

19 de junio
La lucha contra el cáncer, nuevos avances: el ejemplo de los biomarcadores en cáncer y de la medicina personalizada
Jaume Reventós, Hospital Vall d'Hebrón
Ciclo «Desafíos del siglo XXI. La voz de la medicina, III»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

EXPOSICIONES

Microvida. Más allá del ojo humano
Cosmocaixa, Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

Darwin. El viaje de un naturalista
Producción del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York
Museo Marítimo de Barcelona
www.mmb.cat



OTROS

12 de junio - Debate
¿Qué son y para qué sirven las colecciones de historia natural? Presente y futuro de un patrimonio frágil
Hèctor Botella, Museo de Geología de la Universidad de Valencia
Jesús Català, Universidad Cardenal Herrera-CEU
Anna Omedes, Museo de Ciencias Naturales de Barcelona
Octubre Centro de Cultura Contemporánea
Valencia
www.octubre.cat

Del 9 al 12 de junio
XII Congreso nacional de virología
Universidad de Burgos
cab.inta-csic.es/congresovirologiasev2013

13 de junio – Café científico
Estrategias de conservación y gestión de la biodiversidad
Santi Mañosa, Universidad de Barcelona
Bar de Ca l'Estruc, Sabadell
www.icp.cat

HISTORIA DE LA CIENCIA

Cuarenta años de libertad asintótica

La peculiar historia de la teoría de las interacciones fuertes

El 4 de julio de 2012 pasará a los anales de la física por ser el día en que se anunció el descubrimiento de una nueva partícula de propiedades coincidentes con las del esperado bosón de Higgs. Aquella pieza era la última que faltaba para completar el modelo estándar, la teoría con la que los físicos describimos las partículas elementales y sus interacciones. Resulta difícil contener la admiración que despiertan los pioneros que contribuyeron a formularla. Su construcción, sin embargo, no siguió un curso lineal. Repasar los momentos que mediaron entre el desconcierto y la comprensión constituye un ejercicio muy útil, que nos enseña mucho sobre la naturaleza del descubrimiento científico y sobre la siempre cambiante sociología del colectivo de investigadores.

Este mes nos brinda la ocasión para recorrer ese camino, ya que en él se cumplen 40 años de la publicación de dos artículos que marcaron un hito en la construcción del modelo estándar. Ambos aparecieron de forma contigua en el número de *Physical Review Letters* del 25 de junio de 1973. Uno de ellos estaba firmado por David J. Gross y Frank Wilczek, por aquella época en la Universidad de Princeton; el otro, por H. David Politzer, por entonces en Harvard. En 2004, los tres investigadores recibieron el premio Nobel por la aportación que aquellos trabajos hicieron a uno de los pilares de nuestro modelo actual de la naturaleza: la teoría de las interacciones fuertes.

El vacío como un medio

Hacia los años cincuenta del siglo xx la física de partículas había comenzado a desgajarse de la física nuclear. Se aceptaba que ciertas partículas elementales representaban los constituyentes últimos de la materia y que, en última instancia, todos los fenómenos de la naturaleza se debían a las cuatro interacciones que mediaban entre ellas: la gravitación, el electromagnetismo, las interacciones débiles y las interacciones fuertes.

Fue también en aquella década cuando se culminó el primer eslabón del modelo estándar: la electrodinámica cuántica, o QED, por sus siglas en inglés. Según su versión clásica, formulada en el siglo xix por James Clerk Maxwell y Hendrik A. Lorentz, las partículas dotadas de carga eléctrica se atraían o repelían por acción de un vehículo llamado campo electromagnético. Este se propagaba por el espacio, de forma análoga a como las ondas acústicas lo hacen en un medio. En el caso de las ondas electromagnéticas, el equivalente a dicho medio recibió el nombre de éter. Con la llegada de la QED el concepto de éter fue sustituido por el de *vacío*; pero, en numerosos aspectos, su similitud con un medio material continúa vigente.

En la nueva teoría cuántica la distinción entre partícula y campo desaparece. Las partículas se conciben como estados físicos del campo. Y, del mismo modo que los fotones corresponden a estados excitados del campo electromagnético, el resto de las especies de partículas, como los electrones, poseen también su propio campo asociado.

La teoría predecía nuevos fenómenos que pronto fueron confirmados por los experimentos. Aunque realizar cálculos en QED no era tarea sencilla, resultaba posible gracias al pequeño valor de la intensidad de la interacción. Como muestra de ello, valga mencionar que la contribución electromagnética a la masa de un átomo es minúscula: unas 37.000 veces menor que la energía en reposo del electrón.

La QED predice la posibilidad de crear pares de partículas (electrones y positrones) desde el vacío; tantas como permita el principio de conservación de la energía. Esta propiedad nos lleva a imaginar el vacío como un gran recipiente de partículas y a establecer ciertas analogías con algunos medios materiales, como los dieléctricos.

Como toda sustancia ordinaria, dichos materiales constan de un gran número de protones y electrones, si bien en conjunto son eléctricamente neutros. Las cargas que componen un dieléctrico poseen cierta libertad de movimiento, por lo que, al incorporar un electrón en el seno del material, este tiende a atraer hacia sí densidades de carga positiva. Como resultado, a partir de cierta distancia, la carga del electrón añadido parece menor de lo que realmente es. Decimos entonces que el medio se polariza y apantalla dicha carga.

En el vacío de la QED ocurre un fenómeno muy similar, denominado polarización del vacío. No obstante, existe una diferencia fundamental con el caso de los dieléctricos: el vacío cuántico se comporta como un depósito inagotable de partículas. Por tanto, dado que la carga del electrón que medimos en el laboratorio resulta finita, su «verdadero» valor debería ser infinito.

Ese resultado condujo a algunos de los físicos más brillantes de la época, como Lev D. Landau, a concluir que, a pesar de su excelente acuerdo con los experimentos, la QED debía ser errónea. Para la mayoría de los físicos, sin embargo, lo más importante era que, a la escala de distancias que los experimentos eran capaces de resolver, la teoría permitía calcular resultados correctos gracias a la pequeña intensidad de la interacción.

Cristales y quarks

Pero ¿qué ocurría con la interacción fuerte, la responsable de mantener unido el núcleo atómico? Todos los intentos de seguir un guion parecido al de la QED habían fracasado. Tanto fue así que, durante los años sesenta y principios de los setenta, se llegó a dudar de que existiera un campo cuántico asociado a las interacciones fuertes. Al igual que hoy, la mayoría de los experimentos consistían en hacer colisionar partículas a grandes velocidades. Pero, lejos de revelar los constituyentes últimos del protón, estos no hacían sino producir más y más partículas nuevas de vida efímera.

Además de la carga eléctrica habitual, dichas partículas poseían otros tipos de cargas conservadas. Pero estas no aparecían de forma independiente: si se las representaba en un plano, conformaban un patrón similar a una pequeña red cristalina. Y, al igual que ocurre con cualquier cristal, todos los puntos de esa red podían obtenerse a partir de las combinaciones de unos pocos vectores básicos.

Así aparecieron los quarks. Estos fueron propuestos en 1964 por Murray

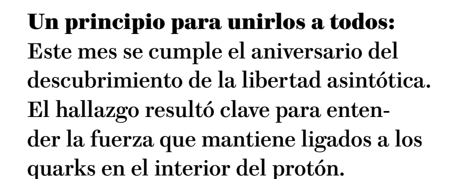
Gell-Mann y George Zweig como los hipotéticos portadores de las cargas asociadas a dichos vectores básicos. Las cargas del protón y el neutrón, por ejemplo, se obtenían al sumar tres de esos vectores. Curiosamente, unos diez años antes Chen N. Yang y Robert Mills habían formulado una teoría de campos similar a la QED para ese tipo de cargas (en jerga técnica, una teoría gauge no abeliana), pero su intento de aplicarla a las interacciones fuertes no tuvo mucho éxito.

A finales de los años sesenta se llevaron a cabo nuevos experimentos en el acelerador de Stanford en los que se hacían chocar electrones contra protones. Una manera sencilla de interpretar los resultados era suponer que en el interior del protón había ciertos constituyentes que interaccionaban con los electrones de forma puramente electromagnética. Estos recibieron el nombre de partones. Su existencia planteaba numerosas paradojas. ¿Guardaban alguna relación con los quarks? Y, si no se hallaban sometidos a la interacción fuerte, ¿por qué no escapaban del protón? ¿Cómo era posible que una partícula que sí experimentaba la interacción fuerte estuviese formada por otras que no lo hacían?

A la resolución de esos dilemas contribuyeron de manera fundamental los artículos cuyo cuadragésimo aniversario celebramos este mes. Los trabajos de Gross, Wilczek y Politzer demostraban que, a diferencia de lo que ocurre en QED, existe una clase de teorías en las que la intensidad de la interacción aumenta con la distancia. Dicha propiedad recibió el nombre de libertad asintótica porque, a distancias infinitamente pequeñas, las partículas no experimentan fuerza alguna y se comportan como partículas libres.

Si las interacciones fuertes pertenecían a esa familia, podía entenderse por qué, a las pequeñas longitudes exploradas por el electrón, los partones (que, en efecto, no eran otros que los quarks) parecían no experimentar fuerza alguna. En cambio, a escalas mayores, como las correspondientes al tamaño del protón, la intensidad aumentaría y las interacciones fuertes harían honor a su nombre.

Para hacernos una imagen intuitiva del fenómeno, podemos imaginar que los tres quarks que forman un protón se encuentran unidos por un muelle o cuerda elástica. Cuando dos de ellos se encuentran muy próximos, no notarán su tensión. Pero cuando un quark se intenta separar de sus compañeros, la goma se tensa y la fuerza incrementa su magnitud. Ello explica también por qué los quarks no pueden extraerse del protón. Lo máximo que conseguiremos —si disponemos de la energía suficiente— será «romper la cuerda». Pero esto solo producirá dos nuevos quarks en los extremos rotos.



Un principio para unirlos a todos: Este mes se cumple el aniversario del descubrimiento de la libertad asintótica. El hallazgo resultó clave para entender la fuerza que mantiene ligados a los quarks en el interior del protón.

Liberarlos resulta tan imposible como separar el polo norte y el polo sur de un imán: al seccionarlo solo obtenemos dos nuevos imanes, cada uno con sus respectivos polos norte y sur.

Con anterioridad a los trabajos de Gross, Wilczek y Politzer las teorías asintóticamente libres suscitaban todo tipo de dudas. Algunos investigadores creían que no podían existir teorías razonables con dicha propiedad. Tanto en electrodinámica cuántica como en las demás teorías conocidas, la carga efectiva siempre decrecía con la distancia, al igual que en los materiales dieléctricos. ¿Cómo podía tener lugar un *anti*apantallamiento de la carga? Pocos repararon en que, en algunas sustancias (los materiales paramagnéticos), los efectos del medio tienden a reforzar la intensidad del campo, en vez de reducirla.

Juntar las piezas

En 1972 se celebró una conferencia en Marsella, organizada por mi antiguo colaborador Chris Korthals Altes. En ella, el físico Kurt Symanzik se preguntó durante su charla si las teorías propuestas años atrás por Yang y Mills podrían ser asintóticamente libres. Animado por Chris, un joven investigador holandés y futuro premio nóbel, Gerard 't Hooft, se levantó y replicó que sí. Ni Symanzik ni 't Hooft sabían que, poco antes, el físico soviético Iosif B. Jriplóvich había obtenido el mismo resultado.

Pese a que todas las piezas estaban disponibles, faltaba un trabajo científico que las ensamblara. Presumiblemente, porque los pocos investigadores que sabían que las teorías de Yang y Mills eran asintóticamente libres no eran conscientes de sus implicaciones para interpretar los experimentos de Stanford. El descubrimiento, pues, cruzó el charco. Finalmente, fueron tres investigadores estadounidenses procedentes de dos instituciones rivales quienes lo publicaron en los trabajos que conmemoramos hoy.

Cabe preguntarse cómo, después de tanto tiempo, un hallazgo de tal calibre pudo producirse de forma casi simultánea. El lector puede consultar la extensa bibliografía sobre los prolegómenos del descubrimiento, entre la que destacan los discursos pronunciados por los propios autores en la ceremonia de entrega del Nobel (disponibles en www.nobelprize.org). En todo caso, ambos trabajos se complementaban a la perfección: mientras que el de Politzer abundaba más en los detalles del cálculo, el de Gross y Wilczek se centraba en las consecuencias para la teoría de las interacciones fuertes.

Después los acontecimientos se precipitaron y, en muy poco tiempo, se llegó a la formulación moderna de la teoría de las interacciones fuertes, conocida como

cromodinámica cuántica. Esta incluye quarks y campos de Yang-Mills, cuyas correspondientes partículas llamamos gluones. Las cargas vectoriales no son las que en un principio consideraron Yang y Mills, sino otras que denominamos cargas «de color». Tanto ese nombre (que no guarda ninguna relación con los colores de la luz) como la teoría de Yang-Mills basada en tales cargas ya habían aparecido en algunas publicaciones previas a los trabajos de Politzer, Gross y Wilczek. La aceptación generalizada no se demoró mucho más; a ella contribuyó en gran parte la «revolución de noviembre» de 1974, asociada al descubrimiento de un nuevo tipo de quark.

El cálculo de las predicciones de la nueva teoría se vio facilitado por las técnicas concebidas en 1971 por 't Hooft y su entonces director de tesis, el también premio nóbel Martinus Veltman, *Tini*, quien años más tarde se convertiría en profesor a tiempo parcial de nuestro departamento de la Universidad Autónoma de Madrid. Los sucesivos resultados de la teoría fueron corroborados a la perfección por los experimentos de los aceleradores; una vivencia que tuve la suerte de experimentar en primera persona.

A medida que los datos y nuestra capacidad de cálculo han ido ampliándose, los éxitos de la cromodinámica cuántica se han mostrado apabullantes. Resulta muy difícil señalar a un investigador como padre único o principal de la teoría. Lo mismo cabe decir sobre el momento exacto en que se produjo su descubrimiento. No obstante, los artículos que hoy conmemoramos bien pueden considerarse el hito principal en dicha historia.

—Antonio González-Arroyo
Instituto de Física Teórica UAM/CSIC
Universidad Autónoma de Madrid

CIENCIA CIUDADANA

Ornitología participativa

Una modesta tentativa de enrolar en un proyecto de investigación a observadores de aves aficionados ha generado una riada de datos y contribuye a replantear las normas de la actividad científica

Tras los ventanales de la oficina de Steve Kelling, en casi 60 hectáreas de bosque, 50 especies de pájaros (vireos gorjeadores, piquigruesos, ampelis americanos), casi todas paseriformes, han ido llegando de un día para otro. Estamos a comienzos de mayo, empieza a caer la tarde, y sus trinos y llamadas resuenan clamorosas por todo el bosque. Una colosal cacofonía. Es un milagro que en el laboratorio de ornitología de la Universidad Cornell, en Ithaca, N.Y., Kelling, o cualquier otra persona, logre concentrarse en su trabajo.

Su trabajo, desde luego, está al otro lado del ventanal. Kelling activa en su portátil una animación: un mapa de EE.UU. perfilado en blanco sobre fondo negro. Al pie del mismo, una barra va señalando el paso del tiempo, un año en total. Al principio nada ocurre. Súbitamente, hacia abril, aparece en California del Sur un fogonazo anaranjado, que se expande como un incendio hacia el norte y el este, hasta que todo el tercio occidental estadounidense está como en llamas, destellando y fluctuando en varios matices de blanco y naranja. Después, el fenómeno se invierte: el color se va esfumando de norte a sur, hasta que, hacia noviembre, todo el mapa queda otra vez oscuro. Acabamos de observar la migración anual y la estancia de la tangara (*Piranga ludoviciana*).

Se dispone ya de mapas migratorios para más de 300 especies, generados a partir de datos recopilados por eBird, un proyecto de ciencia ciudadana nacido hace diez años, que Kelling, en calidad de director de información científica del laboratorio, supervisa. El proyecto tiene en México una versión en español, aVerAves, creado en colaboración con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Hace poco, a lo largo de un mes, unos 11.000 ornito-aficionados subieron más de tres millones de avistamientos a la base de datos de eBird, que supera ya los 110 millones de registros. En esta empresa han participado en total unas 90.000 personas, y el número de registros aumenta cada año en torno a un 40 por ciento.

Los observadores de aves son famosos por lo compulsivo de su dedicación y la meticulosidad con que registran sus avistamientos. Sin embargo, hasta hace poco, la compartición de sus datos ha venido siendo más bien azarosa y, en gran medida, sin relación con los trabajos de los científicos. La situación está cambiando. Kelling y sus colegas se cuentan entre los precursores en la nueva «ciencia participativa» o «ciencia ciudadana». Los medios técnicos (Wi-Fi, teléfonos inteligentes, capacidad de procesamiento) han revolucionado lo que la ciencia puede hacer con los datos suministrados por profanos; gracias a tales medios, se está reclutando un ejército de aficionados ansiosos de tomar parte en la investigación auténtica.

No son los ornitólogos los únicos en beneficiarse de este fenómeno. Científicos de campos tan diversos como la ecología, la antropología o la sanidad pública han empezado a explotar esta vía de comunicación que la tecnología les ha abierto, y a conectar con personas dispuestas a colaborar por el mero gozo de hacerlo, o por el fruto de los resultados. Los hallazgos de eBird ponen de relieve cuán valiosa puede resultar la participación pública en un campo de investigación concreto.

El gran alcance que puede lograr esta forma de trabajar señala un cambio en la consideración que científicos y público general otorgan a la empresa que llamamos ciencia. Está plasmándose una nueva era de ciencia ciudadana, justo cuando la sociedad va a necesitarla más, por tener ante sí problemas que, como el cambio climático, requieren tanto un gran acopio de datos como la implicación activa de la población.

De vuelta a las raíces

A Steven Mlodinow, médico de familia en Longmont, Colorado, y ávido observador de aves, la participación en eBird le hace sentirse un poco como un Linneo moderno, el naturalista sueco del siglo XVII tenido por padre de la taxonomía moderna. «Si se mira el pasado —opina Mlodinow—, todos los naturalistas fueron personas sin formación específica previa, y la ciencia avanzó, sobre todo, gracias a individuos autodidactas o con escasa formación universitaria.»

Los aficionados siempre han tenido un lugar en la ciencia. Thomas Jefferson recopiló datos meteorológicos durante 50 años; Henry David Thoreau registró

asiduamente los tiempos de floración de las plantas de los bosques locales. Algunos de los más grandes logros científicos se deben a personas con escasa o nula formación en su campo, como Nikola Tesla, Srimivasa Ramanujan, Isaac Newton o Charles Darwin.

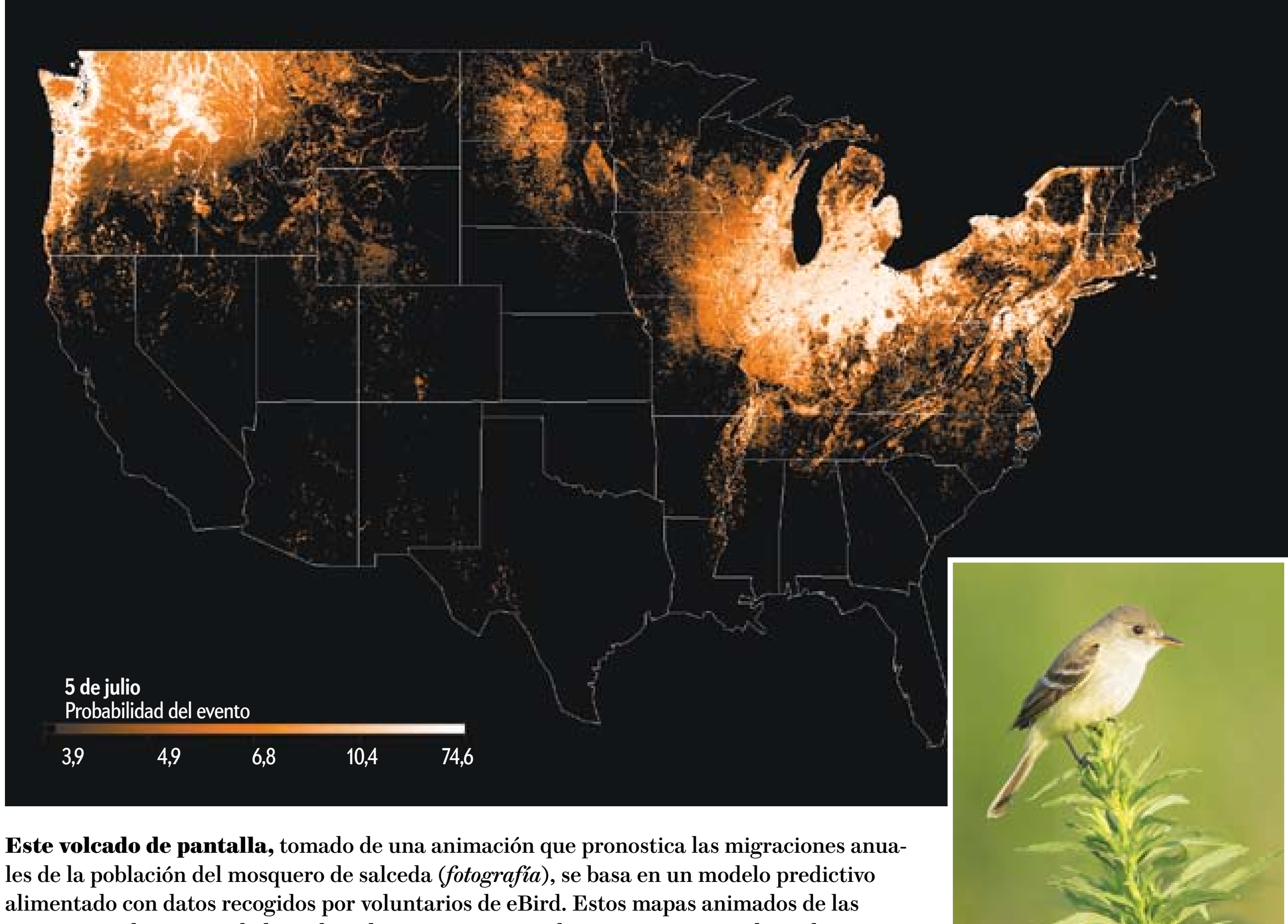
Tal vez la meteorología ofrezca el ejemplo más claro. Allá por 1840, el primer secretario de la Institución Smithsoniana concibió una red de estaciones meteorológicas que serían encomendadas a voluntarios. El proyecto engulló una considerable porción del presupuesto de la Institución; llegó a contar con 600 partícipes. El telégrafo facilitó a los voluntarios compartir el casi medio millón de observaciones recogidas anualmente. Al cabo, la red fue integrada en agencias gubernamentales, pero incluso en nuestros días pervive una red cooperativa de estaciones meteorológicas. De ella han surgido descubrimientos sobre regularidades climáticas, precipitaciones nivales o sobre las vicisitudes de la vegetación y la importancia de la topografía. También ha hecho posibles los mapas de sequías, de los que todavía dependemos [*veáse* «Todos a bordo», por Kalee Thompson; Investigación y Ciencia, julio de 2012].

La ornitología es terreno particularmente idóneo para naturalistas aficionados. Estos muestran ya, para empezar, gran propensión a recoger datos; llevan haciéndolo desde hace siglos. Los fareros, en concreto, mantenían registros detallados de las aves que avistaban. El Recuento Navideño de Aves, auspiciado por la Sociedad Audubon, es tradición desde hace más de 110 años.

En 2002, cuando se lanzó eBird, sus creadores tenían en mente una duda: ¿cómo podrían los naturalistas aficionados recopilar datos útiles para usos científicos? A pesar de que se han establecido a gran escala redes de sensores automáticos por todo el mundo, destinadas a supervisar prácticamente todos los aspectos del ambiente (carbono atmosférico, flujos de corrientes, contaminación por nitrógeno), la recopilación de ciertos datos sigue necesitando personal. Kelling aclara que no existen sensores autónomos capaces de identificar pájaros ni otros tipos de organismos. Se requieren unos que puedan efectuar las observaciones correctas y tomar las decisiones precisas. En otras palabras, personas de carne y hueso, y, en el caso de eBird, de las que se obsesionan en descubrir, vigilar, contar... y presumir de los pájaros que han observado.

Con todo, el proyecto no tardó en dar contra un muro. Los observadores de aves estaban suministrando unos 50.000 registros mensuales, insuficientes para resultar útiles, y ese número no iba a variar. «Tras dos años y medio nos dimos cuenta de que estábamos fracasando —reconoce Kelling—. Necesitábamos que personas del colectivo de naturalistas aficionados fuesen nuestros paladines.» El laboratorio contrató a dos observadores experimentados para que supervisaran el proyecto; y más tarde, a un tercero.

La clave, como comprendieron enseguida, consistía en garantizar que los observadores obtuviesen para sí algo de aquel montaje. Los científicos de eBird necesitaban datos que pudieran servir para la conservación de especies. Mas eso no era incentivo suficiente para los observadores, que tenían que dedicar tiempo extra a aprender a gestionar la base de datos, a cambiar la forma de sus anota-



GLENN BARTLEY, CORBIS (*pájaro*); CORTESÍA DEL LABORATORIO DE ORNITOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD CORNELL (*mapa*)

Este volcado de pantalla, tomado de una animación que pronostica las migraciones anuales de la población del mosquero de salceda (*fotografía*), se basa en un modelo predictivo alimentado con datos recogidos por voluntarios de eBird. Estos mapas animados de las migraciones han arrojado luz sobre el comportamiento de 300 especies estadounidenses.

ciones y a descargar los datos. Los nuevos líderes del proyecto reflexionaron sobre el tipo de utilidades que a los observadores les encantaría tener a su disposición.

La observación ornitológica consiste, a fin de cuentas, en el mantenimiento y actualización de listas. Así que, para atraer al colectivo de observadores, Chris Wood, uno de los líderes del proyecto, pensó que eBird tendría que ofrecer cosas nuevas y mejores que hacer con esas listas: organizarlas, compartirlas, utilizarlas como base para la competición —casi siempre— amistosa. En la actualidad, eBird es para los aficionados algo así como Facebook, una red social que les permite rastrear y dar a conocer sus vidas aviarias. La base de datos de eBird, más una aplicación para teléfonos inteligentes, les permite organizar todo partiendo de las listas que han recopilado en su vida: las especies que han avistado, las veces que han observado a una determinada, o lo que han visto en sus enclaves favoritos. Y no menos importante: pueden ver las listas de los demás... y poner empeño en superarlos.

Pero eBird no es solo diversión y juegos con pájaros. La ciencia ciudadana se enfrenta a graves problemas, no siendo el menor la verificación de la fiabilidad de los datos. Una de las formas en que los directivos de eBird contribuyen a mantener la calidad de los datos consiste en designar a ciertos observadores como expertos regionales. En Colorado, Mlodinow y otros dos colaboradores (Bill Schmoker, profesor de ciencias, y Christian Nunes, vigilante de la vida silvestre) dedican varias horas a la semana a subir a la base de datos sus observaciones y a cribar las ajenas. Examinan los datos que el sistema señala como inciertos, que pueden corresponder a hasta un ocho por ciento de los tres millones de registros insertos cada mes. Su trabajo contribuye a mantener la mayor exactitud posible en esos registros.

Esos esfuerzos parecen estar dando fruto. Los datos de eBird están aumentando y empiezan a tener impacto en la política pública. Al superponer las distribuciones de eBird sobre los mapas de EE.UU., los investigadores han determinado qué aves amenazadas o en peligro de extinción se encuentran en el territorio de cada agencia federal y en qué época del año, datos que las agencias utilizan para determinar sus prioridades presupuestarias.

Un nuevo proyecto, BirdCast, emite pronósticos de migraciones. Mediante la combinación de los datos de eBird con imágenes de radar, datos meteorológicos y modelos informáticos, BirdCast podrá generar dentro de poco predicciones semanales de migraciones para cualquier región de EE.UU. (En la actualidad, el laboratorio emite pronósticos semanales solo durante los períodos migratorios de primavera y otoño, e informes especiales en el caso de acontecimientos excepcionales, como el huracán Sandy.) Estos informes, explica Kelling, podrían lograr que las ciudades apagasen la iluminación de sus centros urbanos, o que los parques eólicos detuvieran sus aerogeneradores, en las noches en que miles de aves los están sobrevolando.

Proyectos de ciencia ciudadana de todos los pelajes están generando investigaciones con aplicaciones prácticas. LiMPETS, un programa de vigilancia a largo plazo de la costa californiana, recurre a maestros y escolares para recopilar datos que ayuden a dirigir operaciones de limpieza tras vertidos de crudo u otros tipos de contaminación del litoral. El Departamento de Recursos Naturales de Wisconsin recurre a sus ciudadanos para mantener tablas de datos sobre el aire, las aguas y la vida silvestre de su localidad. En el Sahel africano, un proyecto universitario sobre la meningitis, se funda en observaciones de las pautas climáticas, a cargo de habitantes de los poblados de la región, para pronosticar el comienzo de la estación lluviosa, época en que el riesgo de meningitis disminuye abruptamente y la vacunación resulta innecesaria; el proyecto contribuye a ampliar el suministro de vacunas.

Más allá de contribuir a la política pública, la ciencia participativa resuelve un problema de escala. Los científicos no pueden ir inmediatamente a un lugar cualquiera, hecho que nos deja con lo que Arfon Smith, director de ciencia ciudadana en el Planetario Adler de Chicago, denomina «nieblas de ignorancia», puntos de un mapa donde se carece casi por completo de datos históricos sobre, por ejemplo, acontecimientos meteorológicos o biodiversidad. Al incrementar el número de personas que observan el mundo, mejora nuestra capacidad para comprenderlo.

Un nuevo campo científico

Casi 300 personas atiborraban una sala del Centro de congresos de Oregón durante todo un asfixiante fin de semana del mes de agosto, para celebrar la Conferencia de participación pública en la investigación científica. Los congresistas dedicaron dos días a exponer proyectos, presentar bases de datos y otras utilidades, y a la crónica de contribuciones científicas históricas debidas a aficionados. Su alegato final fue que la participación del público en la ciencia podría constituir un motor de cambio. La conferencia concluyó con una masiva tormenta de ideas sobre los aspectos formales que la ciencia ciudadana habría de adoptar (una organización profesional, congresos anuales y una publicación periódica).

ORNITOLOGÍA CIUDADANA EN ESPAÑA

La ornitología *amateur* tiene también en España una larga y sólida tradición. Estos son algunos de los proyectos y organizaciones en los que científicos y ciudadanos colaboran para avanzar en el estudio de las aves:

www.seo.org > Sociedad Española de Ornitología / Birdlife. Coordina varios programas participativos de seguimiento de avifauna. Entre otros, el proyecto Sacre, que estudia la evolución de la población de las aves comunes en época reproductora; empezó en 1996, cuenta con la participación de unos 1000 voluntarios y se integra en el Esquema Paneuropeo de Monitorizaje de Aves Comunes (PECBMS).

Ornitho.cat > Portal dedicado al intercambio de información sobre las observaciones de aves de Cataluña. Es una iniciativa del Instituto Catalán de Ornitología (ICO) vinculada con el Banco de Datos de Biodiversidad de Cataluña y promovida conjuntamente con el Departamento de Medioambiente y Vivienda y varias entidades ornitológicas y naturalistas de ámbito local.

Seguimiento de Aves Comunes en Cataluña (SOCC) > Empezó en 2002. Su objetivo es determinar las tendencias de las especies de aves comunes para obtener indicadores ambientales. Lo lleva a cabo el ICO en colaboración con centenares de ornitólogos voluntarios y se integra en el PECBMS.

Atlas de las aves nidificantes de Barcelona > Impulsado por el Ayuntamiento de Barcelona, el ICO y la Universidad de Barcelona, se propone conocer la localización de todas las especies de aves que crían en la ciudad para obtener una herramienta de utilidad para la gestión y la planificación ambiental del municipio

Una de las razones por las que se presiona para crear una disciplina oficial es el trueque transversal de ideas entre áreas de investigación muy distantes: ecología, astronomía, ciencias de cómputo, epidemiología. En la opinión de Jennifer Shirk, investigadora del laboratorio de Cornell, los científicos de la ciencia participativa necesitan un foro donde reunirse y compartir sus proyectos. Los investigadores podrían nutrirse de los éxitos o fracasos de otros en tareas como la recluta de voluntarios o la de habérselas con masas inmensas de datos.

Para que la participación pública en la investigación científica llegue a adquirir naturaleza propia será necesario resolver varios problemas. Para empezar, ¿cómo entretejer los muy diferentes objetivos y tipos de proyectos? Los investigadores han tratado de catalogarlos. En lo fundamental, los proyectos de ciencia ciudadana se mueven entre dos enfoques básicos: o bien el público sirve directamente a los científicos o los científicos sirven al público.

Galaxy Zoo, sede de parte de la mejor información astronómica del mundo, comenzó con un grupo de investigadores posdoctorales asfixiados por las descargas de datos del Sondeo Digital del Cielo Sloan. En la actualidad, Galaxy Zoo incluye imágenes del telescopio espacial Hubble y ha engendrado una familia de proyectos en línea de ciencia ciudadana, llamada Zooniverse, cuyos participantes ayudan a dar sentido a los datos. Los casi 720.000 partícipes de Zooniverse transcriben observaciones meteorológicas de barcos de la Primera Guerra Mundial, identifican especies tomadas del fondo marino o categorizan cánticos de ballenas. Los científicos se benefician de todos estos proyectos.

En el otro extremo del espectro, investigadores del grupo ExCiteS (Extreme Citizen Science), formado recientemente en el Colegio Universitario de Londres, están ayudando a comunidades marginadas a adquirir vigor propio mediante la ciencia. En uno de los proyectos, miembros de un barrio londinense recogieron más de 1100 tomas sonoras mediante fonómetros, para demostrar que un desguace cercano producía un ruido ensordecedor. Expertos del sistema de información geográfica de dicha universidad transformaron los datos en un mapa sonoro del barrio, que resultó esencial para convencer a las autoridades locales de que regulasen el volumen sonoro del desguace.

Tales proyectos de base comunal confieren a la ciencia un carácter de iniciativa social. En la conferencia de Portland, uno de los participantes habló de «incorporar múltiples tipos de conocimiento»: informaciones de las comunidades indígenas, cazadores de las localidades u otras personas con sabiduría tradicional o un profundo sentido del lugar. A algunos científicos, tal tipo de ideas puede resultarles difícil de tragar.

Muki Haklay, codirector de ExCiteS, cree llegada la hora de evolucionar. En su opinión, los investigadores deberían considerar la ciencia participativa meramente como «una forma diferente de producir conocimiento científico». Cuando en el barrio londinense se midieron los niveles sonoros, por ejemplo, Haklay explica que no presentó los resultados como si se tratase de conclusiones científicas definitivas. Se limitó a trasladarlos a las autoridades locales como prueba de que era necesario que fueran y vieran. «Se hace una declaración de lo que importa y de por qué es importante en la vida de la gente», hace notar.

Una de las aportaciones más importantes de la ciencia ciudadana puede ser, en definitiva, la difusión de la cultura científica, al poner a profanos en contacto directo con el proceso de la ciencia. «Me gusta mucho la idea de que se aumente la comprensión del método científico, implicando a la gente en los entresijos de la ciencia —asegura Smith—. Si se puede ver más del proceso real y se entra en contacto con más aspectos del flujo de trabajo científico, sin duda será buena cosa.»

En la primavera de 2012, una tarde soleada, yendo en compañía de Mlodinow, Schmoker y Nunes, todos de eBird, hacia un punto de observación ornitológica en Colorado, les pregunté por qué dedicaban tanto tiempo al proyecto. Sentía curiosidad por saber si eran meros «benefactores» o si se sentían en algún tipo de deuda con eBird, que les había proporcionado utilidades informáticas y recursos nuevos. «Para muchos aficionados rigurosos —me dijo Mlodinow—, el aspecto científico es lo que más importa. A menudo tratamos de diferenciar subespecies, de averiguar cuáles son las gamas de subespecies, algo que, de hecho, se ignora, sobre todo en las migraciones. Pienso que, a la larga, estos trabajos van a cambiar lo que sabemos y comprendemos sobre dónde y cómo se distribuyen las subespecies.» Así se expresa un auténtico científico.

—Hillary Rosner
Periodista especializada en ciencia y medioambiente

FÍSICA CUÁNTICA

Información desde el vacío

El vacío cuántico también está entrelazado. Una propuesta para extraer las correlaciones existentes entre sus puntos promete aplicaciones en el campo de la información cuántica

Es muy probable que el lector haya oído hablar del entrelazamiento cuántico. En los últimos años, este concepto ha trascendido las discusiones entre especialistas en mecánica cuántica y ha llegado incluso a formar parte del argumento de algunas series de televisión, como *Fringe* o *FlashForward*. El entrelazamiento entre varios objetos cuánticos implica que sus propiedades se hallan fuertemente correlacionadas con independencia de la distancia a la que se encuentren. Sin embargo, una noción mucho menos familiar tal vez sea la del entrelazamiento entre distintas regiones del vacío cuántico.

En un trabajo reciente realizado junto con Borja Peropadre, Marco del Rey y Eduardo Martín Martínez, del Instituto de Física Fundamental del CSIC, ideamos un experimento para extraer las correlaciones cuánticas entre dos regiones del vacío separadas temporalmente (es decir, una pasada y otra futura) y transmitirlas a un sistema físico. Nuestra propuesta, publicada en julio del año pasado en la revista *Physical Review Letters*, sería realizable con los medios técnicos actuales y podría resultar de utilidad en el diseño de la memoria de un futuro ordenador cuántico.

Desde un punto de vista clásico, en el vacío no hay literalmente nada. Sin embargo, la física cuántica nos dice que, en realidad, el vacío se corresponde con la configuración de energía mínima de un campo; por ejemplo, el campo electromagnético. El principio de incertidumbre de Heisenberg implica que ningún estado cuántico puede poseer una energía perfectamente definida todo el tiempo. Por tanto, tampoco el vacío. De hecho, si consideramos intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños, la indeterminación en la energía del vacío puede alcanzar cotas relativamente elevadas.

Con cierta pompa, los físicos hemos denominado tal fenómeno «fluctuaciones cuánticas del vacío». Estas deben entenderse como sigue. En cada punto del espacio y en cada instante de tiempo hay una cierta probabilidad de que se cree un par de partículas, las cuales serán reabsorbidas por el vacío casi de inmediato. Estas partículas sutiles duran tan poco tiempo que no pueden propagarse por el espacio ni llegar hasta un detector de partículas, motivo por el que reciben el nombre de «virtuales». Podemos imaginarlas como pompas de jabón que aparecen y se quiebran de súbito. Los puntos del vacío cuántico se hallan entrelazados porque, en tiempos y distancias muy cortos, la probabilidad de que en una región surja un número determinado de tales burbujas se halla correlacionada con la probabilidad de que el mismo fenómeno ocurra en otro sitio.

Del vacío a un qubit

A principios de este siglo, Benni Reznik, de la Universidad de Tel Aviv, y sus colaboradores publicaron una serie de artículos en los que proponían transferir dicho entrelazamiento entre regiones del vacío a un par de qubits. Un qubit es el análogo cuántico de un bit: un sistema de dos estados («0» y «1»), pero con la diferencia fundamental de que estos no son clásicos, sino cuánticos. La idea de Reznik y sus colaboradores era sencilla. Si podemos preparar un par de qubits en un estado carente de correlaciones y, después, hacerlos interaccionar con el vacío durante

DEL PASADO AL FUTURO POR MEDIO DEL VACÍO

El entrelazamiento entre puntos distantes del vacío puede inducir correlaciones cuánticas en un sistema físico. Para ello, un qubit superconductor *P* («pasado») interacciona con el vacío del campo electromagnético ($\Delta\psi$) durante un tiempo $T_{encendido}$. Después de un intervalo $T_{apagado}$ en el que la interacción se suprime, un segundo qubit *F* («futuro», separado del primero una distancia *r*) interacciona también con el vacío. Al final del proceso, las correlaciones cuánticas del vacío se habrán transferido a los qubits.

Un circuito superconductor (*bucle superior*) atravesado por un flujo magnético (Φ_1) puede funcionar como un qubit y acoplarse al vacío del campo $\Delta\psi$ con la ayuda de otros dos circuitos auxiliares (*bucles inferiores*). El acoplamiento entre el qubit y el vacío puede desactivarse con extrema rapidez modulando la intensidad del flujo magnético que atraviesa los circuitos auxiliares (Φ_2 y Φ_3).

cierto tiempo, al final del proceso ambos quedarán entrelazados.

Para entenderlo, pensemos primero en un intervalo de tiempo lo bastante largo como para que un rayo de luz pueda recorrer la distancia que separa ambos qubits. Si inicialmente habíamos preparado uno de ellos en el estado de energía más elevada, este podrá pasar en algún momento al estado de menor energía. En el proceso, emitirá un fotón, el cual podrá viajar hasta el segundo qubit. Si este se encontraba en su estado de energía más baja, al absorber el fotón experimentará una transición al estado de energía superior. De esta manera, no resulta tan sorprendente que los estados de ambos qubits se hallen correlacionados.

Imaginemos ahora que el intervalo de tiempo es tan corto que un fotón real jamás podría cubrir la distancia entre ambos qubits. Aun así, el mismo proceso puede haber tenido lugar con burbujas virtuales. Dado que los procesos virtuales que suceden en las inmediaciones del primer qubit se encuentran correlacionados con los que ocurren cerca del segundo, así también lo estarán los estados de los qubits. Si logramos verificar que dichas correlaciones implican un auténtico entrelazamiento (es decir, que se trata de correlaciones genuinamente cuánticas, inalcanzables por medios clásicos), habremos demostrado la posibilidad de entrelazar dos qubits únicamente a partir de las fluctuaciones del vacío.

La situación se torna aún más interesante si consideramos una idea brillante que Tim Ralph y Jay Olson, de la Universidad de Queensland, publicaron en 2011. Einstein nos enseñó que el espacio y el tiempo no resultan tan diferentes. Al igual que decimos que un rayo nunca cae dos veces en el mismo sitio, el vacío en una región determinada del espacio tampoco puede estar burbujeando con gran intensidad todo el tiempo. Si así ocurre en un momento determinado, cabe esperar un poco de calma en el futuro próximo. Ralph y Olson demostraron que esas correlaciones del vacío entre distintos instantes de tiempo son realmente cuánticas y sugirieron que también podrían transmitirse a qubits.

Para ello, en lugar de hacer que los qubits interaccionen al mismo tiempo con el campo cuántico, la idea consiste en lograr que lo hagan en momentos diferentes: uno en el «pasado» y otro en el «futuro», mientras que en un tiempo intermedio (el «presente») no hay interacción. Si los qubits terminan el proceso entrelazados y las distancias y tiempos son tales que impiden el intercambio de fotones entre ellos, entonces dicho entrelazamiento solo puede deberse a las correlaciones entre las burbujas virtuales del pasado y las del futuro.

Memorias cuánticas

En nuestro trabajo demostramos que semejante procedimiento se hallaría al alcance de los últimos avances técnicos en circuitos superconductores. La superconductividad es un fenómeno puramente cuántico por el que ciertos metales dejan de oponer resistencia al paso de la corriente eléctrica cuando se enfrían a temperaturas cercanas al cero absoluto. Con circuitos superconductores, podemos diseñar objetos que se comporten como qubits y unirlos por un cable por el que se propaguen ondas electromagnéticas.

En nuestro artículo también analizábamos algunas aplicaciones de interés. Uno de los usos del entrelazamiento es el teletransporte cuántico. A pesar de su nombre, este fenómeno guarda poca relación con las familiares escenas de *Star Trek* o con el experimento al que se somete el protagonista de *La mosca* de David Cronenberg. En lugar de teletransportar un objeto, lo que se hace es transmitir el estado de un qubit a otro qubit distante, empleando para ello el entrelazamiento y el resultado de una medida. Por tanto, la posibilidad de generar un entrelazamiento entre dos instantes de tiempo nos abre la puerta a teletransportar el estado de un qubit desde el pasado hacia el futuro; es decir, preservar el estado del qubit durante cierto intervalo de tiempo.

Dado que la información de nuestro futuro portátil cuántico deberá almacenarse en qubits, el método propuesto nos brinda una posibilidad para construir la memoria de dicho dispositivo. La información del qubit del pasado se codifica en el vacío durante el presente y es recuperada en el qubit del futuro. Por el momento, nuestra memoria cuántica no sería la más eficiente, ya que solo hemos demostrado que la información podría guardarse durante un nanosegundo (unas 50.000 veces menos que el tiempo que «vive» un qubit supercondutor). Sin embargo, la idea de convertir el vacío del interior de un cable en una memoria no deja de resultar atractiva. ¿Ustedes la comprarían?

—Carlos Sabín Lestayo
Escuela de Ciencias Matemáticas, Universidad de Nottingham



El destello luminoso procedente del impacto de un neutrino activa los sensores de este detector (*recreación artística*).



FÍSICA DE PARTÍCULAS

MENSAJEROS FANTASMALES DE NUEVA FÍSICA

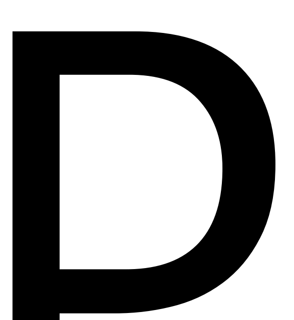
Las exóticas propiedades de los neutrinos podrían aportar las pistas necesarias para ir más allá del modelo estándar

Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod

Martin Hirsch investiga en el grupo de física de altas energías y astropartículas del Instituto de Física Corpuscular, centro mixto de la Universidad de Valencia y el CSIC.

Heinrich Päs trabaja en la Universidad Técnica de Dortmund. *The Perfect Wave*, su libro sobre neutrinos, ha sido publicado recientemente por Harvard University Press.

Werner Porod es profesor de física teórica en la Universidad de Wurzburgo.



POCOS FÍSICOS HAN TENIDO EL PRIVILEGIO DE TRAER AL MUNDO UNA NUEVA PARTÍCULA elemental. Sin embargo, cuando Wolfgang Pauli concibió el neutrino en 1930, las dudas templaron su entusiasmo inicial. «He hecho algo terrible», confesaría más tarde a sus colegas de profesión. «He postulado una partícula imposible de detectar.»

El neutrino es decididamente esquivo. Su naturaleza fantasmal le permite atravesar casi todas las barreras físicas, también los materiales que componen los detectores de partículas. De hecho, fluyen constantemente a través de la Tierra sin apenas interaccionar con nada. Pero los temores de Pauli se revelaron un tanto exagerados: sí resulta posible detectar neutrinos, aunque ello exija grandes dosis de ingenio y afán experimental.

Los neutrinos resultan muy extraños por varias razones. No forman átomos ni guardan relación alguna con la química. Son las únicas partículas elementales de materia que no poseen carga eléctrica. Su masa resulta ínfima: menos de la millonésima parte de la masa de la siguiente partícula más ligera, el electrón. Y, mucho más que cualquier otra partícula, los neutrinos se metamorfosean: su identidad fluctúa entre las tres variedades, o *sabores*, que se conocen: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico.

Los físicos llevan más de 80 años perplejos ante las propiedades del neutrino. Hoy en día aún ignoramos algunas de sus propiedades más básicas. ¿Existen solo tres sabores de neutrinos o hay más? ¿Por qué poseen una masa tan minúscula? ¿Son el neutrino y el antineutrino la misma partícula? ¿Por qué mutan de identidad con tanto brío?

Numerosos experimentos en todo el mundo, ya sea en colisionadores de partículas, en reactores nucleares o en pozos de minas abandonadas, se dedican a investigar tales cuestiones. Sus respuestas deberían proporcionar información clave sobre la estructura íntima de la materia. Además, las extrañas propiedades del neutrino tal vez guíen a los físicos en su empeño por formular una teoría de gran unificación: una que combine todas las partículas e interacciones —salvo la gravedad— bajo una misma estructura matemática. El modelo estándar, la mejor teoría de la que disponemos hasta el momento, no puede acomodar todas las complejidades del neutrino. Por ello, debemos ampliarlo.

LA CUESTIÓN DE LA MASA

En lo que se refiere al sector del modelo estándar que incluye los neutrinos, la manera más estudiada para extenderlo consiste en

EN SÍNTESIS

Los neutrinos bien pueden considerarse las partículas elementales más enigmáticas que existen. Extremadamente ligeros y carentes de carga eléctrica, su detección reviste especial complejidad.

Los físicos aún no comprenden bien el origen de su exigua masa. Tampoco saben si el neutrino y el antineutrino corresponden a partículas diferentes o si, por el contrario, son idénticos.

Hasta la fecha se han detectado tres especies de neutrinos. Los de un tipo pueden metamorfosearse en otro de manera espontánea, un proceso cuyo origen sigue sin entenderse por completo.

Desentrañar la verdadera naturaleza de estas partículas podría allanar el camino hacia una teoría unificada y ayudaría a entender el origen de la asimetría cósmica entre materia y antimateria.

PÁGINAS ANTERIORES: VAULT49

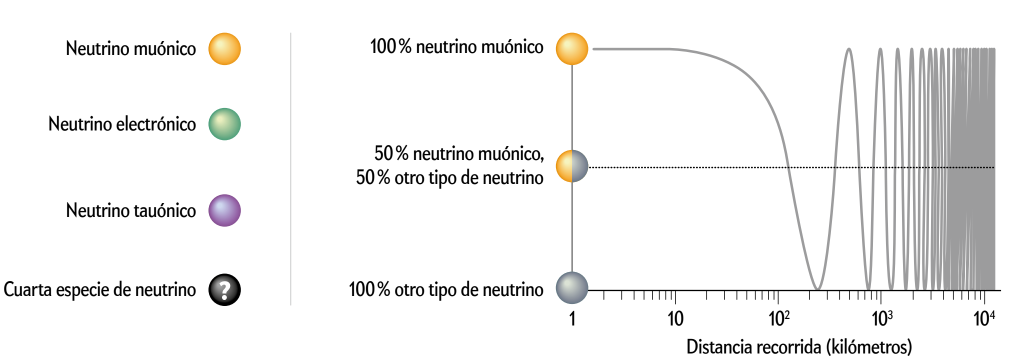
UNA PROPIEDAD BÁSICA

Oscilaciones de neutrinos

Los neutrinos se propagan a velocidades próximas a la de la luz. A medida que avanzan, ya sea a través del espacio, la Tierra o un cuerpo humano, los neutrinos de un tipo se transforman en otro; decimos que «oscilan». Ese comportamiento no es errático: la probabilidad de esas transformaciones puede predecirse a partir de las propiedades de las partículas.

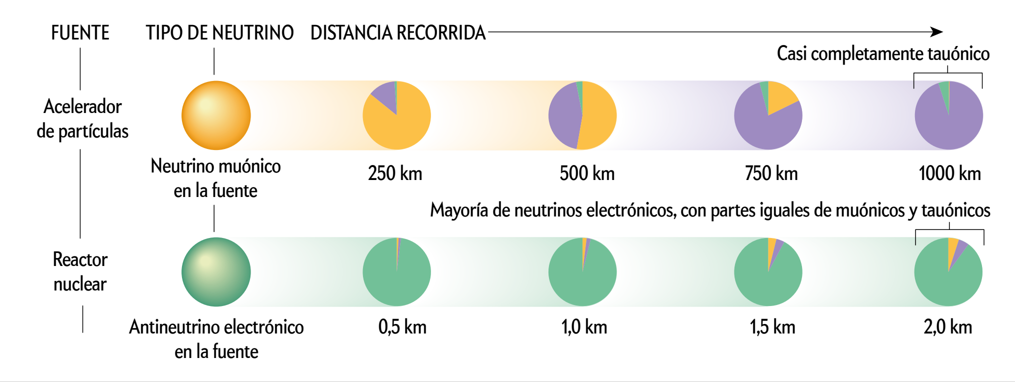
Paleta de sabores

Existen al menos tres especies, o sabores, de neutrinos: el electrónico, el muónico y el tauónico. Algunos físicos sospechan la existencia de un cuarta clase. Esta gráfica ilustra la probabilidad de que un neutrino muónico cambie de sabor tras recorrer cierta distancia. En la práctica, las distancias de oscilación dependen de la energía del neutrino.



Transformaciones típicas

Los experimentos miden cómo cambia el sabor de los neutrinos que emite una fuente cuando llegan a un detector distante. Las gráficas muestran varios patrones de oscilación fuente-detector idealizados, según se trate de experimentos en aceleradores de partículas o en reactores nucleares.



JEN CHRISTIANSEN

postular la existencia de ciertas entidades denominadas neutrinos dextrógiros. La quiralidad de una partícula (su cualidad de levógira o dextrógira) puede entenderse como una versión de la carga eléctrica que determina si dicha partícula participa o no en la interacción nuclear débil, la causante de las desintegraciones radiactivas. Solo las partículas levógiras experimentan la interacción débil. Por tanto, los hipotéticos neutrinos dextrógiros serían incluso más difíciles de detectar que sus compañeros levógiros, los cuales sí han sido observados experimentalmente y son los que forman parte del modelo estándar.

Los neutrinos se clasifican como leptones, la misma familia de partículas a la que pertenece el electrón. Los leptones no experimentan la interacción fuerte, la responsable de mantener unidos a protones y neutrones en el interior del núcleo atómico. Dado que los neutrinos carecen de carga eléctrica, tampoco toman parte en la interacción electromagnética. En consecuencia, los neutrinos levógiros solo experimentan las interacciones gravitatoria y débil. Un neutrino dextrógiro, sin embargo, sería inmune también a esta última.

La existencia de neutrinos dextrógiros resolvería de forma bastante razonable uno de los enigmas asociados a estas partículas: su diminuta masa. Las partículas elementales que poseen masa la adquieren gracias a su interacción con el campo de Higgs, un campo físico que impregna todo el universo. Se cree que la partícula descubierta hace casi un año en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN es el bosón de Higgs. Este último corresponde a una manifestación del campo de Higgs, del mismo modo que el fotón constituye una manifestación del campo electromagnético. En ese proceso de adquisición de masa, el campo de Higgs se acopla al «equivalente débil» de la carga eléctrica. Por tanto, dado que los neutrinos dextrógiros no poseen dicha carga, su masa no depende del campo de Higgs. En su lugar, esta se debería a un mecanismo completamente distinto que bien podría tener lugar a las altísimas energías características de la gran unificación. Esa propiedad convertiría a los neutrinos dextrógiros en partículas muy pesadas.

Los efectos cuánticos podrían relacionar las propiedades de los neutrinos dextrógiros con las de sus hermanos levógi-

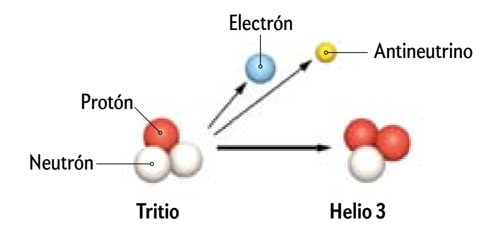
EXPERIMENTOS

En el corazón de la antimateria

Varios experimentos en todo el mundo estudian un exótico proceso radiactivo llamado desintegración beta doble. Con ello, pretenden averiguar si neutrinos y antineutrinos son la misma partícula. De ser el caso, los neutrinos podrían alterar el equilibrio entre materia y antimateria, lo cual ayudaría a entender por qué en nuestro universo la primera domina sobre la segunda.

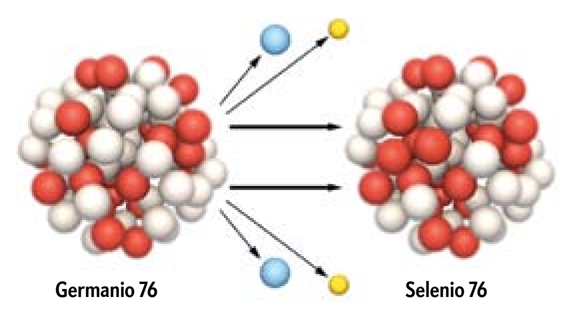
Desintegración beta simple

Algunos núcleos radiactivos experimentan desintegraciones beta. En ellas, un neutrón se transforma en un protón y emite un electrón y un antineutrino. Aquí, un núcleo de tritio se transmuta en uno de helio 3.



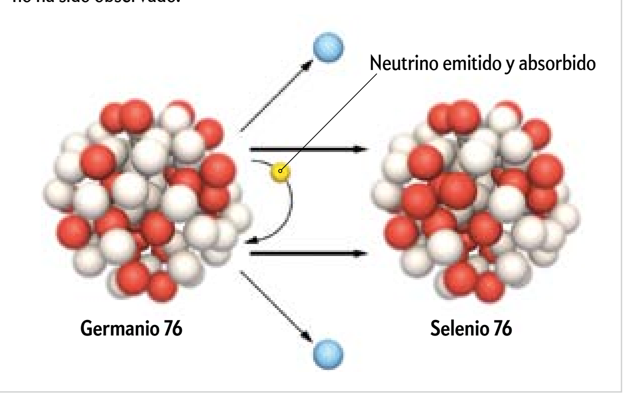
Desintegración beta doble

Ciertos isótopos pueden sufrir dos desintegraciones beta simultáneas. Dos neutrones se convierten en dos protones y emiten dos electrones y dos antineutrinos.



Desintegración beta doble sin neutrinos

Si los neutrinos fuesen su propia antipartícula, los procedentes de las dos desintegraciones beta podrían cancelarse (una de las desintegraciones absorbería un neutrino en lugar de emitir un antineutrino). Este proceso aún no ha sido observado.



GEORGE RETSECK

ros de tal modo que la masa de los primeros «infectase» a los segundos. La intensidad de ese contagio, sin embargo, resultaría minúscula, lo que dotaría a los neutrinos levógiros de una masa ínfima. Esta relación se conoce como mecanismo de balancín (*seesaw*), ya que una masa muy elevada «levanta» a otra minúscula.

Otra explicación para dar cuenta de la masa de los neutrinos se basa en la supersimetría, una de las teorías más estudiadas para extender el modelo estándar. Según esta hipótesis, por cada una de las especies de partículas conocidas debería existir una compañera muy similar pero con distinto espín. Por tanto, la supersimetría multiplica al menos por dos el número de partículas elementales. Dado que hasta ahora nadie ha detectado ninguna de tales *supercompañeras*, en caso de existir, su masa tendría que ser enorme. En un futuro, tal vez el LHC alcance la energía necesaria para producirlas y determinar sus propiedades.

Uno de los rasgos más atractivos de la supersimetría reside en que una de las nuevas partículas predichas por la teoría, el neutralino, constituiría un candidato perfecto para dar cuenta de la materia oscura cósmica, la misteriosa sustancia invisible que se cree que compone la mayor parte de la masa de las galaxias y los cúmulos de galaxias. Aunque dicha sustancia no absorbe ni emite luz, los físicos sospechan de su existencia porque pueden observar los efectos gravitatorios que ejerce sobre la materia visible. Pero, para explicar la materia oscura, el neutralino tendría que ser muy estable; es decir, no podría desintegrarse con rapidez en otras partículas [*véase* «Mundos oscuros», por J. Feng y M. Trodden; Investigación y Ciencia, enero de 2011].

Un neutralino con una vida demasiado corta devolvería a sus pupitres a los investigadores de la materia oscura, pero supondría una bendición para los físicos de neutrinos. La estabilidad del neutralino depende de una hipotética propiedad llamada paridad R, la cual prohíbe que las supercompañeras se desintegren en las partículas ordinarias del modelo estándar. Pero si la paridad R no existe, el neutralino sería inestable y su desintegración dependería, en parte, de la masa del neutrino.

Dos de nosotros (Hirsch y Porod), en colaboración con José Valle, de la Universidad de Valencia, y Jorge C. Romão, de la Universidad Técnica de Lisboa, hemos demostrado que esa relación entre los neutrinos y el neutralino podría medirse en el LHC. Si la estabilidad del neutralino depende del neutrino, la vida media del primero podría deducirse a partir de las propiedades conocidas del segundo. Además, el neutralino viviría el tiempo suficiente para que los detectores del LHC pudieran registrar todo el proceso desde su producción hasta su desintegración.

MATERIA Y ANTIMATERIA

Todas las explicaciones plausibles sobre la pequeñez de la masa de los neutrinos apuntan a ámbitos inexplorados de la física. Pero una de ellas, el mecanismo de balancín, tal vez nos ayude a resolver otro misterio que lleva decenios abrumando a los físicos: por qué la materia acabó prevaleciendo sobre la antimateria tras la gran explosión que dio origen a nuestro universo.

Todas las partículas del modelo estándar tienen su correspondiente antipartícula, idéntica a la primera pero con cargas opuestas. Así, la carga eléctrica del electrón es –1 y la del antielectrón, o positrón, +1. Cuando un electrón y un positrón chocan, sus cargas se cancelan. Ambas partículas se aniquilan y solo dejan tras de sí un destello de radiación. El hecho de que el neu-

trino dextrógiro no posea cargas de ningún tipo abre las puertas a una posibilidad muy interesante: que neutrinos y antineutrinos sean idénticos. En jerga técnica, decimos que el electrón y el positrón son partículas de Dirac; por otro lado, un neutrino idéntico a su antineutrino sería clasificado como partícula de Majorana. Si el mecanismo de balancín se mostrase correcto, los neutrinos levógiros no solo se verían contagiados por la masa de sus compañeros dextrógiros, sino también por su cualidad de partículas de Majorana. En otras palabras, si algunos neutrinos son idénticos a su propia antipartícula, entonces lo mismo ocurre con todos ellos.

Semejante propiedad acarrearía varias consecuencias fascinantes. Entre ellas, la posibilidad de que los neutrinos provoquen transiciones entre partículas y antipartículas. En los procesos ordinarios, el número leptónico (el número de leptones menos el número de antileptones) se conserva. Los neutrinos, sin embargo, violarían esa regla, lo cual generaría un desequilibrio entre la cantidad de materia y la de antimateria. Esa asimetría ha desempeñado un papel fundamental en la evolución del universo. Si después de la gran explosión la cantidad de materia hubiese sido igual a la de antimateria, ambas se habrían aniquilado y no habrían dejado nada con lo que formar galaxias, planetas o vida. Físicos y cosmólogos se preguntan desde hace tiempo por qué en nuestro universo predomina la materia sobre la antimateria.

Una nueva generación de experimentos en colisionadores de partículas, reactores nucleares y pozos de minas abandonadas debería proporcionar datos clave sobre las propiedades de los neutrinos

DESINTEGRACIONES BETA DOBLES

La posible equivalencia entre neutrinos y antineutrinos no tiene por qué quedar relegada al ámbito de las teorías sin confirmar. Numerosos experimentos, pasados y presentes, han intentado verificar dicha hipótesis mediante el estudio de ciertas reacciones nucleares exóticas: las desintegraciones beta dobles.

La confirmación experimental de la existencia del neutrino llegó de la mano de la desintegración beta, el proceso por el que un neutrón de un núcleo atómico se convierte en un protón y emite un electrón y un antineutrino. Algunos isótopos radiactivos pueden experimentar dos desintegraciones beta simultáneas. En circunstancias normales, ello implica la emisión de dos electrones y dos antineutrinos. Sin embargo, si el neutrino fuese una partícula de Majorana, el antineutrino emitido durante la primera desintegración podría ser absorbido en la segunda. Como resultado, se produciría una doble desintegración beta en la que no se emitirían ni neutrinos ni antineutrinos. Donde no había ningún leptón aparecerían de repente dos de ellos (los electrones), pero sin los antileptones que usualmente equilibran la balanza. Por tanto, el proceso violaría la conservación del número leptónico.

Hoy por hoy, la búsqueda de desintegraciones beta dobles sin emisión de neutrinos ofrece las mejores posibilidades de determinar empíricamente si los neutrinos son partículas de Majorana. Y, desde un punto de vista más general, brindan también las mejores perspectivas para comprobar si existen procesos que violen la conservación del número leptónico.

En principio, el experimento que debe llevarse a cabo es simple: se toma un isótopo que pueda experimentar dos desintegraciones beta simultáneas, como el germanio 76, y se espera a que aparezcan dos electrones sin los correspondientes antineutrinos. En la práctica, sin embargo, tales experimentos resultan muy difíciles de realizar. Las desintegraciones beta dobles son muy exóticas, por lo que deben reunirse grandes cantidades de germanio o de otros isótopos para documentarlas con fiabilidad. Para empeorar las cosas, el flujo constante de partículas subatómicas provenientes de los rayos cósmicos ahoga la exigua señal de dichas desintegraciones. Por ello, los experimentos deben llevarse a cabo bajo tierra, en minas abandonadas u otros laboratorios subterráneos, para que la roca los proteja de los rayos cósmicos.

El único testimonio de una posible desintegración beta doble sin neutrinos fue referido en 2001 por la colaboración Heidelberg-Moscú. Pero, por desgracia, este ha sido puesto en tela de juicio por otros experimentos. La próxima generación de detectores, algunos de los cuales ya se encuentran tomando datos, debería proporcionar resultados mucho más precisos. Los experimentos EXO-200, en Nuevo México, y KamLAND-Zen, en Japón, publicaron hace poco sus primeros datos. Y aunque parecen contradecir los resultados de la colaboración Heidelberg-Moscú, tampoco pueden descartarlos por completo.

El experimento GERDA, en Italia, que comenzó sus operaciones en 2011, emplea el mismo isótopo que la colaboración Heidelberg-Moscú. Su avanzado diseño intentará poner a prueba el controvertido resultado de su predecesor. Mientras EXO-200 y KamLAND-Zen continúan tomando datos, para 2014 se prevé la puesta en marcha del detector CUORE, también en Italia. Gracias a estos y otros experimentos, resulta razonable esperar que la incógnita que plantea la doble desintegración beta sin neutrinos se resuelva antes del final de la presente década.

PEQUEÑOS MUTANTES

Hallar un nuevo tipo de neutrino o demostrar que neutrinos y antineutrinos corresponden a la misma partícula incrementaría aún más el grado de intriga que los rodea. Pero, al mismo tiempo que investigamos posibles nuevos aspectos de estas partículas, continuamos debatiéndonos para descifrar un atributo bien documentado pero hasta ahora mal entendido: su fuerte tendencia a la metamorfosis. En términos técnicos, decimos que la cantidad de violación del sabor leptónico, o de mezcla de neutrinos, resulta mucho mayor que la mezcla de sabores entre quarks, las partículas que componen los protones y los neutrones.

Numerosos investigadores de todo el mundo intentan explicar este comportamiento a partir de nuevas simetrías de la naturaleza; es decir, mediante conexiones matemáticas que relacionen partículas e interacciones en apariencia distintas. Un ejemplo serían las simetrías que dictan el modo en que las partículas conocidas se transforman unas en otras. En fecha reciente, Gautam Bhattacharyya, del Instituto Saha de Físi-

Un secreto escrito en el cielo

SUDEEP DAS Y TRISTAN L. SMITH

Hasta ahora ha sido imposible medir con precisión la minúscula masa de los neutrinos, y no por falta de intentos. Los numerosos experimentos realizados durante las últimas décadas en laboratorios de todo el mundo tan solo han logrado imponer cotas bastante laxas a las masas de las tres especies de neutrinos.

Contamos con razones de peso para pensar que el mejor método para determinar la masa de estas diminutas partículas consiste, irónicamente, en medir sus efectos sobre la estructura a gran escala del universo. A pesar de su minúscula masa, la ingente cantidad de neutrinos presentes en el cosmos (del orden de 10^{89}) les otorga un papel clave en la evolución del universo.

La idea puede resumirse como sigue. Poco después de la gran explosión se sintetizaron grandes cantidades de helio a partir de núcleos de hidrógeno. Ese proceso liberó un número enorme de neutrinos. A medida que el cosmos se expandía y se enfriaba, las pequeñas fluctuaciones de densidad en esa sopa primordial se fueron amplificando. En las zonas donde la densidad era superior a la media, la gravedad atrajo aún más materia.

La materia oscura, la sustancia invisible que compone la mayor parte de la masa del universo, fue la primera que formó agregados, ya que solo experimenta los efectos de la gravedad (y, a lo sumo, los de la interacción débil). A partir de esas aglomeraciones se formarían más tarde las galaxias y los cúmulos de galaxias. Los neutrinos, al ser extremadamente ligeros, comenzaron a agruparse algo más tarde. Al viajar casi libres por el cosmos, ralentizaron la formación de agregados de materia oscura.

Ese efecto debería ser detectable en la actualidad. Cuanto mayor sea la masa de los neutrinos, más habrían entorpecido la acumulación de materia y más borrosos serían los contornos de las grandes estructuras que observamos hoy. Por tanto, medir con detalle la distribución de masa en el universo permitiría determinar la masa de los neutrinos.

Cartografiar la distribución de materia, la mayor parte de la cual es materia oscura, no resulta sencillo. Sin embargo, se ha observado que el fondo cósmico de microondas (CMB, la radiación fósil de la gran explosión) exhibe ligeras distorsiones. Estas se producen porque, en su camino hacia la Tierra, los fotones se desvían por efecto de la atracción gravitatoria que ejercen las grandes concentraciones de materia oscura. Estudiar ese efecto de lente gravitacional sobre el CMB ofrece un método muy prometedor para medir la distribución de materia oscura en el universo.

Las nuevas medidas de precisión del CMB nos permitirán crear un mapa muy detallado de la distribución de materia oscura. Si esta conforma estructuras con bordes muy bien definidos y separadas por grandes vacíos, podremos concluir que las masas de los neutrinos son ínfimas; si, por el contrario, sus contornos se muestran difusos, sabremos que los neutrinos poseen una masa mayor.

La nueva generación de experimentos sobre el CMB debería permitirnos calcular las masas combinadas de las tres especies de neutrinos con una precisión de cinco millonésimas de la masa del electrón. La posibilidad de medir la masa de la más ligera y esquiva de las partículas a partir de la observación del universo a gran escala continúa sorprendiendo e inspirando a los físicos para profundizar en el estudio de la naturaleza.

Fondo cósmico de microondas

Materia oscura

Imagen distorsionada por la materia oscura

Telescopio

Distorsionado: En su camino hacia la Tierra, el fondo cósmico de microondas sufre distorsiones debido a la gravedad de los grandes cúmulos de materia oscura. Esas deformaciones permiten trazar un mapa de la distribución de materia oscura, cuya forma ha sido a su vez modelada por los neutrinos. A partir de ello pueden imponerse límites estrictos a su masa.

Sudeep Das *es investigador posdoctoral David Schramm en el Laboratorio Nacional Argonne de EE.UU.* ***Tristan L. Smith*** *es investigador posdoctoral en el Centro Berkeley de Física Cosmológica de la Universidad de California en Berkeley.*

ca Nuclear de Calcuta, Philipp Leser, de la Universidad Técnica de Dortmund, y uno de nosotros (Päs) hemos descubierto que tales simetrías afectarían de manera notable al campo de Higgs. La interacción del campo de Higgs con quarks y neutrinos que cambian de sabor implicaría desintegraciones inusuales del bosón de Higgs, las cuales deberían de poder observarse en el LHC. Tales señales podrían ayudarnos a entender las frenéticas transmutaciones de los neutrinos y, en cualquier caso, constituirían uno de los descubrimientos más espectaculares del LHC.

Mientras tanto, otros experimentos intentan medir con exactitud la frecuencia con la que los neutrinos cambian de identidad. Laboratorios como T2K, en Japón, MINOS, en EE.UU., y OPERA, en Italia, detectan haces de neutrinos procedentes de aceleradores situados a muchos kilómetros de distancia. Con ello, persiguen medir qué cambios de sabor tienen lugar cuando estas partículas recorren grandes trayectos a través de la Tierra. Las escalas implicadas resultan de tal magnitud que, en su viaje, los neutrinos cruzan fronteras nacionales. (En 2011, la colaboración OPERA provocó un gran revuelo al anunciar

GEORGE RETSECK

que los neutrinos generados en el CERN, cerca de Ginebra, habían llegado al laboratorio italiano en menos tiempo que el que tardaría la luz en recorrer la misma distancia. Meses más tarde, sin embargo, esos resultados se demostraron erróneos.) Por otro lado, proyectos como Double Chooz, en Francia, Daya Bay, en China, y RENO, en Corea del Sur, miden las oscilaciones de neutrinos producidos en reactores nucleares cercanos [*véase* «En busca de la última transformación de los neutrinos», por I. Gil, P. Novella y M. Cerrada; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011].

Los parámetros que gobiernan las transiciones entre un sabor y otro reciben el nombre de ángulos de mezcla. El último y más pequeño de ellos, también conocido como «ángulo de reactor», fue medido en 2012. Su valor da cuenta de la probabilidad de que un neutrino o antineutrino electrónico cambie de sabor tras haber recorrido una distancia corta. La medición de este parámetro ha abierto las puertas a que futuros experimentos comparen las propiedades de neutrinos y antineutrinos. La observación de cierta asimetría entre ellos, conocida como violación de *CP*, podría contribuir en gran medida a entender la abundancia de materia en nuestro universo.

La relación entre los neutrinos y sus correspondientes antipartículas podría explicar por qué el universo contiene mucha más materia que antimateria

De entre las búsquedas en curso, T2K tiene quizá por primera vez buenas posibilidades de obtener indicios de violación de *CP* en neutrinos. Hoy asistimos a una interesante carrera entre varias colaboraciones para dar respuesta a estas y otras cuestiones clave. El experimento de larga distancia NOvA, en construcción en EE.UU., podría también observar la violación de *CP* en neutrinos. NOvA lanzará un haz de estas partículas a través de la Tierra desde el laboratorio Fermilab, cerca de Chicago, hasta un detector en Minnesota, a 810 kilómetros de distancia. Los neutrinos harán ese viaje en menos de tres milisegundos. Uno de los objetivos del experimento consiste en determinar la jerarquía de masas de los neutrinos; es decir, precisar cuál es el más pesado y cuál el más ligero. Por ahora solo sabemos que al menos dos especies de neutrino tienen masa. Pero, como en otros muchos aspectos, los detalles se nos escapan.

NEUTRINOS ESTÉRILES

Semejante cantidad de experimentos tan distintos ha dado lugar a algunas interpretaciones enfrentadas. Uno de los indicios empíricos más atractivos —y polémicos— sugiere la existencia de una nueva partícula: el neutrino estéril.

Retomando los temores de Pauli, el neutrino estéril solo podría detectarse por medios indirectos, al igual que el neutrino dextrógiro del mecanismo de balancín. (Si bien este último sería mucho más pesado y, desde un punto de vista teórico, ambas partículas resultan casi mutuamente excluyentes.) Sin embargo, dos proyectos podrían haber observado ya algunos indicios de la existencia de un neutrino estéril. El experimento LSND, que funcionó en el Laboratorio Nacional de Los Álamos durante los años noventa, publicó en 2001 ciertos datos que, aunque controvertidos, apuntaban a un tipo de transformación bastante escurridiza: la conversión de antineutrinos muónicos en antineutrinos electrónicos. El experimento MiniBooNE, en el Fermilab, que comenzó a dar sus primeros frutos en 2007, también halló indicios de ese tipo de transmutación. Sin embargo, esas oscilaciones no encajaban bien en el esquema usual de tres neutrinos.

Las leyes de la mecánica cuántica solo permiten las oscilaciones de neutrinos si estos poseen masa y si, además, cada especie posee una masa diferente. Las diferentes masas de los neutrinos podrían generar oscilaciones como las observadas por LSND y MiniBooNE solo si existiese una diferencia de masas adicional a las ya conocidas. En otras palabras, necesitaríamos que hubiese cuatro especies de neutrinos, en lugar de tres. Sin embargo, el acoplamiento de un cuarto neutrino a la interacción débil provocaría que el bosón *Z* (una de las tres partículas que sabemos que median dicha interacción) se desintegrase demasiado rápido. Por tanto, la hipotética nueva partícula no debería experimentar en absoluto la interacción débil. De ahí el calificativo «estéril»: dicho neutrino estaría desacoplado casi por completo del resto de las partículas elementales.

Otros detectores muy distintos y que estudian neutrinos procedentes de reactores nucleares cercanos también han obtenido resultados que podrían apuntar a un neutrino estéril. Varios experimentos han referido una desaparición anómala de antineutrinos electrónicos en distancias muy cortas. Si ello se interpreta en términos de oscilaciones de neutrinos, implicaría la existencia de neutrinos estériles. Otros cálculos sobre la producción de neutrinos en los diferentes reactores parecen también reforzar dicha hipótesis.

Hoy por hoy, sin embargo, los indicios sobre neutrinos estériles son aún incompletos, indirectos y contradictorios, tal y como cabe esperar de una partícula que, en caso de existir, sería extraordinariamente difícil de detectar. Sin embargo, MiniBooNE y un experimento paralelo aún en construcción en Fermilab, MicroBooNE, podrían aportar datos más firmes en un futuro próximo. Por otro lado, los expertos están debatiendo una nueva generación de diseños experimentales que permitiría investigar la anomalía observada en esos reactores.

No deja de resultar sorprendente que tanto el poderoso LHC como los experimentos sobre los humildes neutrinos, que implican energías mucho menores, proporcionen vías complementarias para explorar los engranajes más íntimos de la naturaleza. Más de 80 años después de que Wolfgang Pauli concibiese su «partícula indetectable», los neutrinos aún guardan sus secretos con gran celo. Con todo, la recompensa que supondría desentrañarlos justifica los enormes esfuerzos que, durante las últimas décadas, hemos venido realizando para curiosear en la vida privada de esta partícula.

PARA SABER MÁS

Testing neutrino mixing at future collider experiments. W. Porod, M. Hirsch, J. Romão y J. W. F. Valle en *Physical Review D*, vol. 63, 115.004, abril de 2001. Disponible en **arxiv.org/abs/hep-ph/0011248**

Neutrino masses and particle physics beyond the standard model. H. Päs en *Annalen der Physik*, vol. 11, n.º 8, págs. 551-572, septiembre de 2002. Disponible en **arxiv.org/abs/hep-ph/0209018**

Manuel Ruiz García es catedrático del departamento de biología de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Sus investigaciones se centran en el estudio de la genética de poblaciones, filogenia molecular y filogeografía de una gran variedad de animales neotropicales.



ZOOLOGÍA

El jaguar: genes y conservación

La historia poblacional del gran félido americano revelada por el ADN

Manuel Ruiz García

Dos niños indígenas jugaban en un claro de la selva cuando un jaguar se les acercó. El gran felino empezó a jugar con ellos. Estos, todavía de edad temprana, no mostraron miedo ante el animal. Accidentalmente, el gato arañó a uno de los infantes en la mejilla y el pequeño, enrabietado, golpeó al jaguar con un bastón. El animal simplemente se dio media vuelta y se internó en la selva.

La anécdota, descrita por Alexander von Humboldt, refleja el hecho de que, a pesar de la capacidad de los jaguares para atacar a los humanos, raramente han sucedido incidentes al respecto. (No obstante, en los últimos años se ha informado de algunos casos de jaguares que han matado a humanos en Brasil y Colombia.)

Por el contrario, este gran felino manchado ha sido y es afectado de forma negativa por diferentes actividades humanas, como la caza y la fragmentación del territorio causada, sobre todo, por la deforestación de su hábitat. Debido a ello, en las últimas décadas se ha producido una reducción importante de la distribución geográfica del jaguar, y varios organismos de conservación internacionales lo han incluido en sus listas para promover su gestión y protección.

Pero para favorecer la conservación del jaguar debemos conocer la salud genética de la especie. Interesa averiguar su variabilidad genética, esto es, el número de variantes genéticas existentes y cuán extendidas se hallan en los distintos individuos. También conviene conocer el grado de aislamiento genético, o de intercambio reproductivo, que hay entre las di-

EN SÍNTESIS

El jaguar está considerado una especie vulnerable y su número de individuos se halla en declive. Para diseñar planes de conservación del felino resulta decisivo conocer su variabilidad genética y el grado de aislamiento de sus poblaciones.

La aplicación de marcadores moleculares y diversos procedimientos estadísticos han demostrado que las supuestas razas de jaguares, basadas en criterios morfológicos, no se corresponden con la realidad.

Esos estudios concluyen también que los tamaños históricos de sus poblaciones han sido notables y que la especie no ha atravesado cuellos de botella recientes, aun cuando durante varias décadas se ha cazado intensamente.



El jaguar goza todavía de una buena salud genética, aunque para la conservación de la especie conviene frenar la fragmentación de su hábitat.

versas poblaciones de jaguares descritas. ¿Existen, en realidad, múltiples poblaciones de jaguares con características genéticas diferenciadas o, por el contrario, las distintas poblaciones se hallan conectadas mediante flujo genético y la mayoría de los rasgos se hallan extendidos por todas ellas? La respuesta a estas preguntas determinará si la especie debe ser protegida en cada una de sus poblaciones o si su gestión debe realizarse de forma integral.

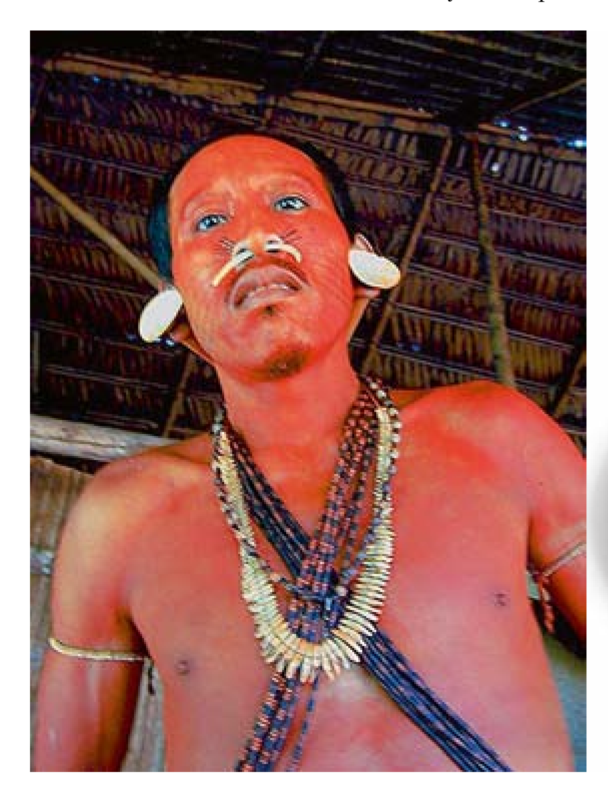
La aplicación de diversos métodos moleculares y otros procedimientos analíticos han permitido abordar esas cuestiones. Los resultados han puesto de manifiesto que las supuestas razas de jaguares, propuestas a principios del siglo xx a partir de datos craneométricos y de la coloración y patrón de las pieles, no se corresponden con la realidad. También han demostrado que los tamaños históricos de sus poblaciones han sido notables y que estas han experimentado una expansión relativamente reciente en la historia.

LA ESPECIE

El jaguar (*Panthera onca*) es el mayor gato silvestre de las Américas. Algunos ejemplares han llegado a pesar hasta 158 kilogramos, aunque el peso habitual en los machos es de unos 100 kilogramos y en las hembras de unos 70 kilogramos. Su talla puede alcanzar hasta los 2,75 metros desde los bigotes hasta la cola. Su extraordinaria capacidad como depredador, al igual que su extrema fuerza física, ha motivado que muchos pueblos indígenas lo hayan considerado una de sus deidades e iconos religiosos más importantes. El templo maya al dios Jaguar en Tikal (Guatemala); los olmecas, que deformaban sus cabezas para que se parecieran a la del gran gato manchado; los matiz, famosos hombres jaguar del río Yavarí, tránsfugas huidizos en la frontera amazónica entre Perú y Brasil que adornan sus caras pintándose los grandes bigotes del gran gato; y los guaraníes, para quienes los eclipses eran causados por el jaguar celestial, constituyen algunos ejemplos de la importancia del félido en la vida de los pueblos indígenas centro y sudamericanos.

El término *jaguar* deriva de un vocablo indígena guaraní, *jaguara*, que significa «comedor de carne que mata a su presa de un solo salto». El animal depreda una ingente variedad de especies; en total, más de 85. Ataca sobre todo a pecaríes, capibaras, pacas, agutíes, armadillos, caimanes y tortugas. Cabe destacar que los jaguares representan los únicos grandes felinos que matan a sus presas penetrándoles el cráneo con sus grandes caninos. Algunos científicos han especulado que su robusta cabeza y poderosos caninos se hallan adaptados para romper las corazas de caimanes y tortugas, tanto terrestres como acuáticas. Según ellos, después de la masiva extinción de herbívoros de finales del Pleistoceno, muchos carnívoros americanos se extinguieron y el jaguar sobrevivió al especializarse en la caza de los muy abundantes reptiles acuáticos de ríos y lagos latinoamericanos.

El félido se ha visto perjudicado por diversas actividades antrópicas. En los años sesenta y setenta del siglo xx, el tráfico de su hermosa piel moteada con rosetas de diferentes formas fue muy intenso. Los Estados Unidos importaron 23.347 pieles entre 1968 y 1969. El país que más contribuyó a esa exportación fue, sobre todo, Brasil, pero también lo hicieron Bolivia, Colombia, México, Paraguay y Perú. Aunque en la actualidad la demanda de pieles no supone la misma amenaza que en décadas pasadas, otros peligros acechan al jaguar. Al haberse reducido los ambientes donde el felino prospera, debido a la mayor extensión de la agricultura, la ganadería y la caza indiscriminada de muchas de sus presas (especialmente el pecarí), numerosos jagua-





Muestras culturales indígenas relacionadas con el jaguar. Las espinas y dibujos en el rostro de este indígena matiz del río Yavarí, en la frontera amazónica entre Perú y Brasil, asemejan los bigotes del jaguar (*izquierda*). Cerámica maya guatemalteca con símbolos alusivos al félido (*derecha*).

SALVO INDICACIÓN CONTRARIA, TODAS LAS IMÁGENES SON CORTESÍA DEL AUTOR

res se han especializado en la caza de ganado vacuno, caballos, cerdos y perros. Por lo tanto, a menudo son eliminados para evitar que destruyan propiedades humanas. Del mismo modo, en algunas zonas de su rango de distribución los jaguares son cazados como alimento por los humanos.

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

Hasta hace pocas décadas, los territorios ocupados por el jaguar se extendían desde el sudoeste de los Estados Unidos hasta la zona media de Argentina. Sin embargo, hoy en día el felino ha sido eliminado casi en su integridad de los Estados Unidos, El Salvador, Uruguay, así como de una buena parte de México, la costa brasileña, Guatemala y Argentina. Su situación tampoco parece ideal en Panamá, Costa Rica, Honduras y, probablemente, en algunas zonas de Perú, Colombia y Venezuela.

Debido a la presión humana, se calcula que la distribución norte del jaguar, en Estados Unidos y México, se ha contraído unos 1000 kilómetros hacia el sur (lo que representa una reducción del área septentrional del 67 por ciento), mientras que, en Sudamérica, su distribución sur se ha contraído unos 2000 kilómetros hacia el norte (un 38 por ciento de reducción del área meridional). Algunos autores afirman que, desde 1900, la distribución geográfica del jaguar ha disminuido un 37 por ciento de forma global, mientras que, desde la llegada de los europeos, la superficie ocupada por él ha pasado de 15.000.000 a 9.340.000 kilómetros cuadrados.

Además, todavía se desconoce el estado de conservación y distribución de la especie en el 17 por ciento (cerca de 3.300.000 kilómetros cuadrados) de su área de distribución histórica anterior a la llegada de los europeos. Esas zonas poco estudiadas abarcan áreas considerables de México, Guatemala, Colombia, Ecuador y Brasil. Debido al declive del jaguar, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) lo clasificó como especie vulnerable, mientras que la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) lo incluyó en el Apéndice I en 1973.

Por lo tanto, el jaguar requiere múltiples estudios de genética, ecología y sistemática para promover su conservación a medio y largo plazo. Pero para ello debemos conocer cuál es el grado de aislamiento genético, o de intercambio reproductivo, que se da entre las poblaciones de jaguares. Si el aislamiento entre ellas es grande, cada población presentará características genéticas propias, lo que motivará una gestión de conservación específica en cada una de ellas. Por el contrario, si todas las poblaciones se hallan conectadas y existe flujo genético entre ellas, la mayoría de los rasgos estarán extendidos por todas ellas y la población conjunta deberá ser manejada de forma integral.

SUBESPECIES DESCRITAS

Antes de abordar el estudio de las características genéticas de las poblaciones de jaguar, recordemos sucintamente las subespecies, o razas, que han sido reconocidas por los zoólogos a partir de variables morfológicas: principalmente, características craneométricas, del pelaje y del tamaño de los animales. Las primeras clasificaciones fueron propuestas por varios autores en el primer tercio del siglo xx, entre las que destaca la de Reginald I. Pocock en 1939. En 1989, Kevin L. Seymour, del Museo Real de Ontario, se basó en el estudio de ese autor para describir las siguientes subespecies: *Panthera onca arizonensis*, distribuida desde Arizona hasta Nuevo México y Sonora; *Panthera onca hernandesii*, en la parte occidental de México, desde Sinaloa hasta Tehuantepec y desde Sinaloa hasta Luisiana, en Estados Unidos; *Panthera onca veraecrucis*, desde el oriente de México (Tabasco, Veracruz y Tamaulipas) hasta el centro de Texas; *Panthera onca goldmani* desde Belice, al norte de Guatemala, hasta Campeche y Yucatán, en México; *Panthera onca centralis*, en el norte, centro y costa pacífica de Colombia, así como en Panamá, Costa Rica, Nicaragua, El Salvador y Honduras; *Panthera onca onca*, desde Venezuela hasta Guyana (parte norte de su distribución), la zona oriental de Brasil, toda la cuenca amazónica (que incluye Colombia, Perú, Ecuador, Bolivia y Brasil), desde Pernambuco hasta Río Grande del Sur, y desde el norte del Mato Grosso brasileño hasta el departamento de Santa Cruz en Bolivia; *Panthera onca peruviana*, en la zona costera de Perú y Ecuador (aunque el estatus de esta subespecie no está claro, ya que el material biológico analizado ha sido muy escaso), y *Panthera onca paraguayensis*, desde el sur de los estados brasileños de Mato Grosso, Paraná y Sao Paulo hasta Paraguay y noreste de Argentina.



Mapa con la distribución geográfica aproximada de las diferentes subespecies de jaguares reconocidas morfológicamente por Seymour en 1989.

Una de las primeras aproximaciones para resolver la realidad de la existencia de esas subespecies fue llevada a cabo en 1997 por Shawn E. Larson, del Acuario de Seattle. El investigador estudió 11 características craneales en 170 especímenes procedentes de diversos museos de Estados Unidos. Al aplicar un análisis discriminante, no halló diferencias apreciables entre las supuestas subespecies. Su estudio concluyó que, desde un punto de vista craneométrico, todos los individuos tendían a presentar una elevada variabilidad, pero en cambio se obser-



De las pieles de jaguares cazados en diversas poblaciones indígenas, el autor obtuvo pequeñas muestras de tejido destinadas al análisis genético. En la imagen, piel procedente de la Amazonía boliviana (Rivera Alta, río Beni).

vaba baja heterogeneidad entre las poblaciones. Ello implicaría que las subespecies descritas de jaguares deberían tratarse como una única unidad evolutiva.

Sin embargo, desde hace numerosas décadas existen datos de que algunas poblaciones de jaguares difieren marcadamente de sus vecinas. Por ejemplo, los jaguares de Campeche, en México (*P. onca goldmani*), los que presentan el menor tamaño de todos, tienen como vecinos, en los estados de Tabasco y Veracruz, animales de talla muy superior (*P. onca veraecrucis*). No obstante, estas diferencias pueden atribuirse más bien a presiones de selección natural diferencial, según el ambiente y el tipo de presas que consumen los félidos, y no a diferentes relaciones filogenéticas entre las poblaciones.

ESTUDIOS GENÉTICOS

La herramienta más poderosa para determinar cuántas unidades evolutivas existen en el mundo de los jaguares, y comprobar así la veracidad de las subespecies descritas, se basa en el análisis de marcadores moleculares. Se trata de genes, o fragmentos de genes, que permiten distinguir individuos o poblaciones. La técnica de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) ha permitido estudiar especies de las que es muy difícil obtener muestras del animal vivo, como es el caso del jaguar (para el análisis, basta con disponer de pelos, manchas de sangre, trozos de huesos o excrementos del animal). Hasta el presente, solo se han realizado unos pocos trabajos desde esta perspectiva con el jaguar, pero los resultados han arrojado luz sobre la evolución molecular del felino. Además, los nuevos datos han ayudado a dilucidar la salud genética de la especie, lo que reviste una enorme importancia para el desarrollo de estrategias de conservación.

Entre los marcadores moleculares que se han aplicado al estudio de los jaguares destacan los microsatélites (STRP, de *short tandem repeat polymorphisms*), pequeños elementos repetitivos de ADN que contienen tándems de 1 a 6 pares de bases. Estos marcadores, que normalmente corresponden a regiones no codificantes, se caracterizan por ser muy abundantes en el genoma de los eucariotas, presentar una distribución aleatoria y ser sumamente polimórficos. Debido a que el número de tándems es muy variable entre los individuos de una especie dada, los microsatélites son extremadamente útiles para diferenciar individuos y para determinar las relaciones de parentesco e, incluso, las relaciones filogenéticas entre especies próximas [*véase* «Microsatélites de ADN», por E. R. Moxon y C. Wills; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999]. También es importante la utilización de genes que se encuentran en el ADN mitocondrial (región de control, *ATP8*, *16S RNA* y *NADH5*), porque poseen elevadas tasas de evolución, no experimentan recombinación (al ser un ADN haploide) y ofrecen detalles muy interesantes del grado de parentesco entre linajes de hembras a lo largo de la historia (ya que el ADN mitocondrial se hereda exclusivamente de la madre).

El primer paso para conocer la salud genética de una población dada consiste en determinar su variabilidad. Todos los datos obtenidos hasta el presente indican que las poblaciones de jaguar exhiben un alto nivel de variabilidad genética. En nuestros estudios hemos comprobado que los 12 microsatélites analizados en 250 jaguares silvestres de toda Latinoamérica poseen un valor promedio de unos 14 alelos, una cifra elevada. También resulta importante la heterocigosis esperada (el porcentaje esperado de individuos heterocigotos para un marcador determinado). Se estima que el 87 por ciento de los animales estudiados son heterocigotos para el promedio de los microsatélites examinados. Este valor supera a los hallados en el otro gran felino americano, el puma, cuya heterocigosis en América varía entre el 42 y el 71 por ciento (en el análisis se incluyeron las diversas subespecies). Esos datos ponen de manifiesto que las poblaciones de pumas han estado sometidas de forma más persistente a los efectos de la deriva genética y cuellos de botella que las poblaciones de jaguares.

Cuando se analiza la diversidad genética del ADN mitocondrial se obtienen resultados semejantes a los hallados con el estudio de los microsatélites. Los jaguares examinados en nuestro laboratorio presentan una alta diversidad nucleotídica (el equivalente de la heterocigosis) en tres genes mitocondriales: *NADH5*, un 8 por ciento; *16S rRNA*, un 4 por ciento, y *ATP8*, un 9 por ciento. (Los valores de heterocigosis para los microsatélites no se pueden comparar directamente con los de diversidad nucleotídica mitocondrial, porque la primera se basa en el ADN diploide del núcleo, mientras que la segunda lo hace en el ADN haploide de las mitocondrias.)

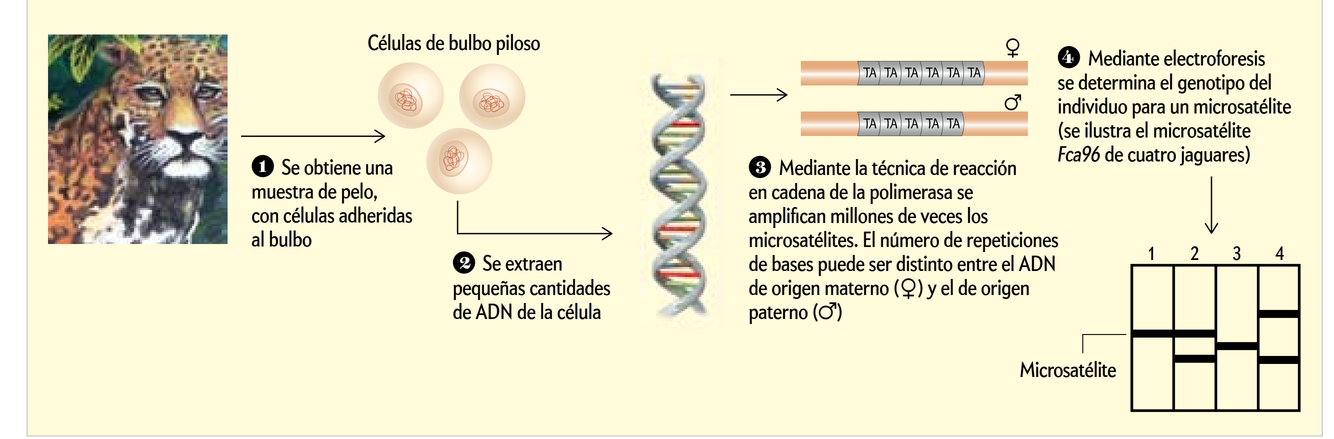
Por lo tanto, en conjunto, los jaguares se caracterizan por una gran variabilidad genética, no solo por lo que respecta al genoma nuclear, sino también al mitocondrial. Los datos resultan alentadores para la conservación del jaguar, ya que las especies con

MARCADORES MOLECULARES

Estudio genético del jaguar: microsatélites de ADN

Algunos conocimientos importantes para orientar la conservación del jaguar, como la diversidad genética de las poblaciones o los cambios que ha experimentado la especie a lo largo del tiempo, pueden estudiarse mediante la aplicación de marcadores moleculares, como los microsatélites del ADN nuclear. Estos están formados por secuencias repetitivas de ADN que se hallan constituidas por tándems de 1 a 6 pares de bases. El número de tándems es muy variable entre los individuos de una especie dada, por lo que los microsatélites resultan muy útiles para diferenciar individuos y para determinar las relaciones de parentesco entre ellos.

Una vez se ha establecido el genotipo de todos los animales mediante el proceso que se ilustra abajo, se realizan los análisis matemáticos derivados de la teoría genético-poblacional que permiten determinar las características de las distintas poblaciones y conocer la evolución de la especie a nivel genético.



elevada variabilidad genética poseen mayores posibilidades de supervivencia ante cambios externos o ambientales.

¿EXISTEN VARIAS SUBESPECIES?

Para poder conservar las poblaciones de jaguares todavía existentes, debemos conocer cuántas unidades genéticamente diferentes hay en la naturaleza. Ello equivale a dilucidar si las subespecies morfológicamente propuestas desde hace décadas, comentadas con anterioridad, se corresponden con diferentes acervos genéticos identificables con métodos moleculares.

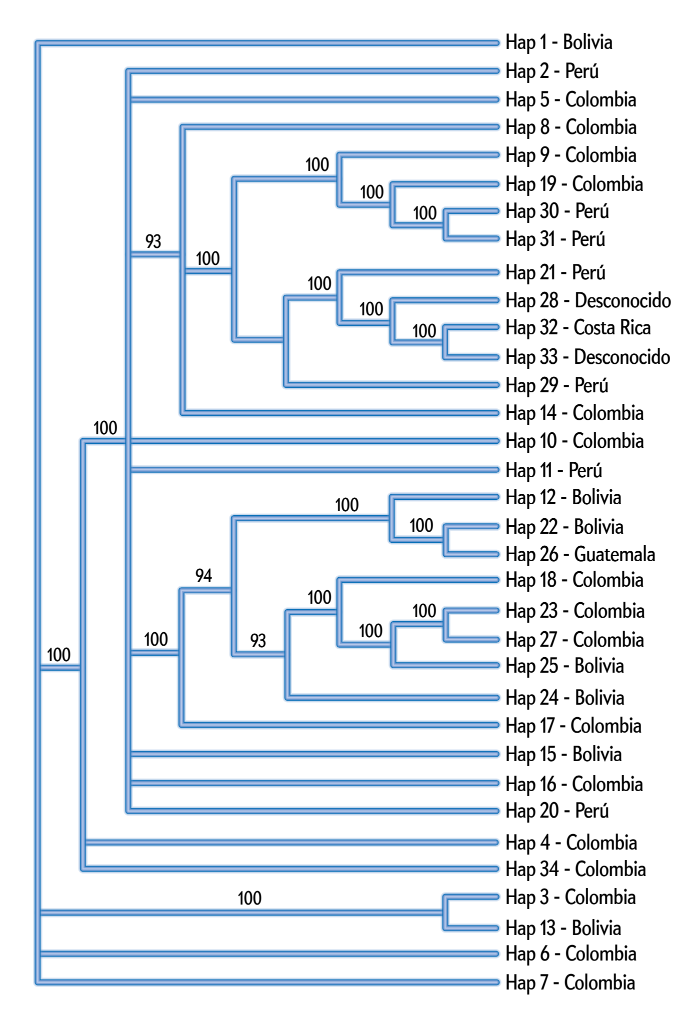
Para averiguarlo, se emplearon ambos tipos de marcadores moleculares anteriormente citados. El análisis de los 12 microsatélites demostró que 4 de ellos (*Fca45, Fca126, Fca136* y *Fca225*) presentaban diferencias entre las poblaciones estudiadas de jaguares. Además, los 12 microsatélites analizados en conjunto permiten diferenciar también esas poblaciones. Sin embargo, la heterogeneidad era relativamente pequeña (mientras que los análisis de heterocigosidad dilucidan la riqueza genética en cada población, los de heterogeneidad determinan el grado de diferencias genéticas entre poblaciones). Los resultados demuestran que, en promedio, las diversas agrupaciones de jaguares consideradas comparten un 97 por ciento de la variabilidad genética (es decir, solo se diferencian en un 3 por ciento). Incluso si comparamos las frecuencias de los microsatélites de poblaciones de jaguares al norte del río Amazonas con las que se hallan al sur de este, la heterogeneidad es tan solo del 0,6 por ciento. Esto es, el 99,4 por ciento de la variación genética es compartida por ambas poblaciones. Por lo tanto, ni siquiera un obstáculo geográfico notable como el río Amazonas ha evitado el contacto genético entre las poblaciones de jaguares. De idéntico modo, el análisis con los tres genes mitocondriales reveló que la heterogeneidad entre los individuos de diferentes regiones sudamericanas era muy limitada. Tampoco el río Amazonas constituyó una barrera geográfica significativa entre las poblaciones para los genes mitocondriales. Ello sugiere que tanto machos como hembras han podido atravesar, históricamente, el mayor río del mundo.

Esos valores de heterogeneidad han sido ratificados por otros autores, entre ellos, Eduardo Eizirik, de la Pontificia Universidad Católica de Río Grande del Sur en Porto Alegre, y sus colaboradores, quienes publicaron sus resultados en *Molecular Ecology* en 2001. También lo han confirmado las estimaciones teóricas que hemos realizado sobre el flujo genético entre dos poblaciones de jaguares en Colombia (la del oeste de la cordillera oriental de los Andes frente a la del este). De los cálculos se deduce que estaría produciéndose un intercambio reproductivo entre ambas poblaciones de entre 3 y 12 jaguares por generación. Se trata de una cifra elevada, la cual indica que, desde un punto de vista reproductivo, las poblaciones no se hallan totalmente aisladas. Sin embargo, hoy seguramente no existen animales que puedan cruzar esa barrera montañosa, al tratarse del área más intervenida y de mayor presión demográfica humana, por lo que es muy posible que esos valores representen estimaciones de flujo génico que se dieron hasta hace poco.

Para determinar si algunas de esas subespecies definidas mediante características craneométricas, del pelaje y del tamaño de los animales constituyen entidades biológicas reales, utilizamos un análisis estadístico basado en la teoría de J. K. Pritchard y otros autores, del año 2000, mediante el programa informático STRUCTURE. El método emplea cadenas de Markov Monte Carlo y genotipos multilocus (los que corresponden a varios genes o microsatélites) para inferir la estructura poblacional y, al mismo tiempo, asignar los individuos a poblaciones específicas. El modelo considera K poblaciones y los individuos son asignados a cada una de ellas o, si sus genotipos son considerados mixtos o híbridos, a dos o más. Cincuenta y seis jaguares fueron genotipificados para 13 marcadores microsatélites.

En un primer análisis, en el que no se incluyeron los orígenes geográficos de los ejemplares, los jaguares fueron asignados a tres grupos diferentes. Sin embargo, cada uno de esos grupos no contuvo animales de zonas geográficas concretas ni presentaron rasgos físicos semejantes. Los animales de diferentes subespecies morfológicas y con diversos orígenes geográficos aparecían entremezclados en los tres grupos. Esta primera aproximación revela que no existen acervos genéticos geográficamente bien delimitados en las zonas estudiadas y que en una misma región geográfica pueden converger animales con perfiles genéticos diferenciados.

Una segunda aproximación incluyó la asignación subespecífica que, a priori, se había hecho de cada animal. Entre los ejemplares analizados, se consideró la existencia de cuatro subespecies (*P. onca goldmani, P. o. centralis, P. o. onca* y *P. o. paraguayensis*). Los resultados demostraron que las mejores probabilidades de asignación correspondían a dos agrupaciones. Igual que en el anterior análisis, se comprobó que esos animales no compartían orígenes geográficos ni características físicas comunes. Así pues, en ningún caso se ratificaron a nivel molecular las subespecies morfológicas establecidas hace décadas por diferentes zoólogos.



Uno de los métodos para determinar la posible existencia de razas o subespecies corresponde al análisis de los diferentes haplotipos mitocondriales del gen *NADH5* en jaguares de distintas procedencias. En la figura se representa un árbol que agrupa en distintas ramificaciones los 34 haplotipos analizados según su afinidad. Se observa que las agrupaciones no siguen un ordenamiento dependiente del origen geográfico del animal muestreado: en una misma agrupación aparecen jaguares de Bolivia, Guatemala y Colombia; en otra, ejemplares de Perú y Costa Rica. Ello significa que las razas morfológicas no están sustentadas por los análisis moleculares. (Las cifras en las ramificaciones indican el porcentaje de fiabilidad de las asociaciones en los árboles.)

Una explicación de la inexistencia de subespecies moleculares de jaguares tiene que ver con la excepcional movilidad y la extensa ocupación territorial de los jaguares. En 1980, George B. Schaller y Peter G. Crawshaw determinaron en Brasil, mediante radiotelemetría, que una hembra tenía un rango de movimiento de 25 a 38 km^2, y un macho, de más de 90 km^2. Se ha calculado que se necesitan casi 4000 km^2 para asegurar una producción anual de varios jóvenes jaguares. También se ha estimado que algunos machos solitarios se desplazan a lo largo de cientos de kilómetros y que, incluso, un animal había recorrido hasta 65 kilómetros en una sola jornada.

En el caso de los jaguares, reviste más importancia el perfil genético individual que las características genéticas que puedan encontrarse en poblaciones determinadas. Para ratificar esta afirmación procedimos a calcular las probabilidades de coincidencia de los perfiles genéticos de dos jaguares cualesquiera a partir de los primeros 8 de los 12 microsatélites que habíamos estudiado. Así, del conjunto de jaguares examinados en Colombia, se necesitaría analizar $6{,}73 \times 10^{14}$ ejemplares para encontrar dos que tuvieran el mismo perfil multigenotipo. Como el lector comprenderá, ni en Colombia ni en el resto del planeta existe tal cantidad de jaguares. Ello significa que resulta prácticamente imposible encontrar dos animales que tengan los mismos genotipos para tan solo 8 de los microsatélites empleados.

DIVERGENCIAS HISTÓRICAS

Otro aspecto importante para comprender por qué no se han desarrollado razas moleculares de jaguares guarda relación con su presencia relativamente reciente en Latinoamérica, hace unos 500.000 años. El jaguar que conocemos hoy es una especie joven. Las selvas latinoamericanas lo recibieron hace mucho menos tiempo que a otros pequeños felinos como los ocelotes y los margay.

De hecho, los tiempos de divergencia entre las poblaciones de jaguares son mucho más recientes que los de algunos felinos mencionados. En 2001, Eduardo Eizirik y sus colaboradores estimaron, a partir de los haplotipos de la región de control del ADN mitocondrial de 37 individuos, una divergencia temporal de entre 280.000 y 510.000 años para las poblaciones de jaguares. Ello significa que los diferentes linajes mitocondriales maternos se empezaron a separar en esas fechas. Esos autores obtuvieron también una filogenia de la especie con figura de estrella, con ramas cortas y compactas, lo cual coincide con un patrón de divergencia reciente. Además, hallaron un haplotipo ancestral ampliamente distribuido por todas las poblaciones al norte del Amazonas, lo cual es sinónimo de un gran flujo genético, al menos en esa zona.

Nuestro estudio con el gen mitocondrial *NADH5* reveló tres tiempos de divergencia en los haplotipos identificados en los jaguares. Los haplotipos más diferenciados se separaron hace entre 500.000 y 600.000 años, lo cual concuerda con los datos de Eizirik. Pero también detectamos otro período de intensa divergencia hace entre 150.000 y 250.000 años y otro hace entre 10.000 y 55.000 años. Esos períodos de fragmentación haplo-

típica se asocian a varios cambios climatológicos. La primera época coincide con el período más frío de la glaciación conocida como Mindel en Europa y Kansas en Norteamérica. La segunda se corresponde con el período glacial Riss I para Europa central e Illinois para Norteamérica. Por último, el tercer período coincide con diferentes picos fríos y secos a lo largo de la cuarta glaciación, que provocaron la fragmentación de las selvas donde habita el jaguar. Por consiguiente, la divergencia y aparición de nuevas variantes de haplotipos mitoncondriales concuerdan con la reducción y fragmentación de las selvas latinoamericanas durante los períodos climatológicos más fríos y secos mencionados.

¿CUELLOS DE BOTELLA?

Un último aspecto de interés para orientar la conservación del jaguar consiste en saber si las poblaciones han pasado por un cuello de botella reciente debido a la caza para la obtención de sus pieles.

Cuando las poblaciones están sometidas a un cuello de botella se produce desequilibrio gamético, esto es, se observa que las frecuencias de los alelos de un gen determinado se correlacionan con las frecuencias de los alelos de otro gen sin que ambos se hallen ligados físicamente. Existen diversos eventos evolutivos que dan lugar a este fenómeno, pero la deriva genética (el cambio aleatorio de las frecuencias alélicas, generación tras generación, debido al número limitado de reproductores) y la endogamia en poblaciones pequeñas constituyen los fenómenos más frecuentes. No obstante, cuando las poblaciones vuelven a expandirse, se produce un decaimiento rápido del desequilibrio gamético.

Sabemos que los microsatélites que hemos estudiado en los jaguares han evolucionado independientemente uno del otro. Por lo tanto, el estudio de estos nos permite conocer si las poblaciones de jaguar han pasado por algún tipo de cuello de botella que les haya hecho perder variabilidad genética. Distintos tipos de análisis han puesto de manifiesto que las poblaciones de Colombia, Amazonía boliviana y colombiana y, globalmente, en toda la Amazonía, no han pasado por un cuello de botella reciente.

Cuando se examinó por separado la población del departamento de Loreto, en la Amazonía peruana, y la de la costa Atlántica y Pacífica de Colombia (la supuesta subespecie *centralis*), se detectaron ciertos indicios de un cuello de botella. En la primera zona hubo una intensa caza de jaguares por sus pieles a finales de los años sesenta del siglo xx. La segunda zona muestra mucha más vulnerabilidad genética que la población oriental y amazónica en Colombia. De hecho, está mucho más castigada por la deforestación y la presencia humana que la zona amazónica. Muchas fincas ganaderas, sobre todo en Antioquía, Santanderes y la costa Atlántica colombiana, han sufrido bajas en el número de cabezas de ganado debido a los jaguares y eso ha provocado una fuerte caza de este animal desde hace décadas en esa área del norte de Colombia. Por consiguiente, tanto la destrucción del hábitat como la caza directa pueden haber dejado su firma a nivel genético en la población colombiana de jaguares.

Sin embargo, la aplicación del test g interlocus (que mide la varianza del número de tándems de repetición en los diferentes microsatélites analizados) a la muestra total de jaguares examinada demostró un claro ejemplo de expansión poblacional, con un aumento del tamaño de las poblaciones y diversificación de linajes haplotípicos. Ello significa que el jaguar muestra la firma inequívoca de una expansión poblacional en su genoma nuclear.

El análisis del ADN mitocondrial (gen *NADH5*) con distintos procedimientos tampoco evidenció ningún cambio demográfico histórico en las distintas poblaciones estudiadas; al contrario, confirmó una fuerte expansión poblacional desde hace unos 500.000 a 600.000 años.

La ausencia de desequilibrio gamético en las poblaciones de jaguares nos hace pensar que, durante la historia natural de esta especie, los tamaños poblacionales han sido notables, la consanguinidad no ha sido importante y la diferenciación genética entre las poblaciones no ha sido extrema, como ya habíamos comentado para otros análisis. Los resultados revelan que los procesos históricos antiguos ejercen una influencia mucho mayor en las características genéticas de las poblaciones actuales que los acontecimientos demográficos acontecidos en las últimas décadas, como la caza indiscriminada en los años sesenta y setenta por las pieles. El pasado más remoto está fielmente grabado en los genes.

Lo comentado no significa que el jaguar no se halle en peligro o en un estado vulnerable. Eizirik y sus colaboradores efectuaron en 2002 diversas simulaciones poblacionales y observaron que una población con un tamaño inicial de menos de 300 individuos tenía una probabilidad de persistencia de entre el 97 y 100 por ciento en 100 años, mientras que se necesitarían unos 650 animales para una persistencia total de 200 años. Del mismo modo, determinaron que el porcentaje de hembras en período reproductivo, los cambios en el tamaño promedio de la camada y, especialmente, la mortalidad en las hembras afectaban de forma ostensible a la población mínima viable de jaguares. De este modo, llegaron a la conclusión de que una población mínima viable debe constar de 650 individuos. Seguramente, muchas de las actuales poblaciones de jaguares más aisladas no alcanzan ese tamaño (por ejemplo, en diversas zonas de México, Guatemala, Costa Rica o la costa Atlántica brasileña).

Globalmente se puede concluir que, desde el punto de vista genético, el jaguar es una especie todavía rica y que no ha sufrido las consecuencias adversas de la deriva genética en poblaciones pequeñas o de los cuellos de botella que caracterizan a muchas especies silvestres debido al impacto negativo de los humanos. Eso abre una luz de esperanza para el futuro de esta formidable especie. Pero es necesario que se conserven amplias áreas de selva inalteradas, con abundantes corredores entre ellas, para que el jaguar pueda seguir siendo su más conspicuo depredador.

PARA SABER MÁS

Movement patterns of jaguar. G. B. Schaller y P. G. Crawshaw en *Biotropica*, vol. 12, págs. 161-168, 1980.

Inference of population structure using multilocus genotype data. J. K. Pritchard, M. Stephens y P. Donnelly en *Genetics*, vol. 155, págs. 945-959, 2000.

Jaguar conservation genetics. E. Eizirik et al. en *Cat News*, número especial, vol. 4, págs. 31-34, 2008.

The effect of habitat fragmentation on the genetic structure of a top predator: Loss of diversity and high differentiation among remnant populations of Atlantic forest jaguars (*Panthera onca*). T. Haag et al. en *Molecular Ecology*, vol. 19, págs. 1000-1016, 2010.

Population genetics and phylogeography of the largest wild cat in the Americas: An analysis of the jaguar by means of microsatellites and mitochondrial gene sequences. M. Ruiz García et al. en *Molecular population genetics, phylogenetics, evolutionary biology and conservation of the neotropical carnivores*, dirigido por M. Ruiz García y J. M. Shostell. Nova Science Publishers, Hauppauge, Nueva York, 2012.

Peter J. Denning es director del Instituto Cebrowski para la Innovación y Superioridad de la Información de la Escuela Naval de Posgrado de Monterrey, en California. Ha sido presidente de la Asociación para la Maquinaria de Computación de EE.UU., una de las instituciones de ciencias de la computación más prestigiosas del mundo.

Tim Bell es subdirector del departamento de ciencias de la computación e ingeniería de programas en la Universidad de Canterbury, en Nueva Zelanda. Dirige el proyecto CS Unplugged, una iniciativa que fomenta actividades gratuitas para aprender ciencias de la computación sin necesidad de ordenador (csunplugged.org).



Información y significado

En la teoría clásica de la información no hay lugar para la atribución de significado. Sin embargo, los humanos insistimos en ello. ¿Cómo reconciliar ambas posturas?

Peter J. Denning y Tim Bell

Desde que el matemático e ingeniero de comunicaciones Claude Shannon la concibiese en los años cuarenta, la teoría de la información ha avanzado con celeridad. Pero, a medida que se desarrollaba y aumentaba su efecto en la vida cotidiana de la gente, han surgido varias cuestiones de interés. La mayoría de las disciplinas científicas dependen de métodos para tratar la información y acceder así a nuevos descubrimientos. Hoy, algunos expertos sostienen que el procesamiento de la información se da incluso en la naturaleza. Sin embargo, nuestros modelos dan por sentado que tales mecanismos transcurren ajenos al significado de la información que procesan. ¿Cómo pueden entonces generar conocimiento?

EN SÍNTESIS

La teoría de la información trata sobre la manipulación y transmisión de códigos, pero es ajena a su significado.

No obstante, el tratamiento adecuado de la información permite generar nuevos conocimientos. ¿De dónde proceden?

Toda infomación consta de un signo y un referente. El significado es el vínculo que se establece entre uno y otro.

Tales vínculos constituyen información nueva. Su incorporación a la teoría permite completar el modelo clásico.

En 1956 IBM diseñó el primer sistema de almacenamiento magnético, el RAMAC 350. Los intentos por hacer tangible el concepto abstracto de información no son algo nuevo: el vídeo promocional de la máquina mostraba habitaciones llenas de ficheros y secretarias extenuadas de buscar en ellos; el RAMAC 350, en cambio, almacenaba el contenido de todos los archivadores en menos de dos metros cúbicos y permitía recuperar los datos de forma casi instantánea.



La teoría clásica de la información demuestra que esta puede emitirse, transmitirse y recibirse de forma precisa sin necesidad de reparar en su significado. Pero los ordenadores van más allá: no solo la transmiten, sino que también la transforman sin atender a lo que significa. ¿Cómo pueden tales procesos crear significado para un observador? ¿De dónde procede la nueva información?

Informáticos, científicos y usuarios buscan programas que generen contenido con significado: experiencias memorables, hallazgos científicos de todo tipo, cartas de amor o imágenes inspiradoras. Sin embargo, el significado parece depender del observador. Una tabla con valores bursátiles puede ser un galimatías para un lego en la materia y, al mismo tiempo, una fuente de gran valor para un inversor. ¿Cómo puede existir una ciencia de la información si sus objetos fundamentales son parcialmente subjetivos?

Las preguntas anteriores parecen paradójicas porque, a pesar de que la teoría de la información nos dice que el significado es irrelevante, nuestra experiencia con los sistemas de computación parece indicar lo contrario. Además, el concepto de información resulta a menudo difuso y abstracto, lo que hace difícil entender cómo funcionan los sistemas que la manipulan. En lo que sigue intentaremos demostrar que la información es real y que existe en forma de patrones observables. Repasaremos algunos de los principios básicos de la teoría clásica de la información, la manera en que esta se combina con la teoría de la computabilidad y dónde se hallan sus límites. En el camino, aprenderemos por qué la teoría clásica no puede explicar el concepto de significado ni la generación de nueva información. Por último, expondremos un modelo que resuelve la paradoja.

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

Los sistemas de procesamiento de información más simples son los sistemas de comunicación. Shannon presentó el primer modelo teórico en 1948, en su artículo «Una teoría matemática de la comunicación». En esencia, operan de la siguiente manera: una fuente emite un mensaje; un codificador emplea un libro de códigos para transformarlo en una señal; esta viaja por un canal hasta llegar al receptor y, por último, un descodificador reconstruye el mensaje original a partir del mismo código. El modelo de Shannon puede aplicarse a cualquier sistema que codifique, descodifique, transmita, almacene o recupere señales o datos. También sirve para modelizar el descubrimiento científico si este se interpreta como la comunicación de un hecho previamente desconocido.

Todo modelo de comunicación debe tener en cuenta el ruido: las alteraciones sufridas por la señal durante el proceso

Fuente, mensaje y código: Claude Shannon (1916-2001) diseñó el modelo que con los años se convertiría en la base de la teoría de la información: una fuente representa el conjunto de todos los mensajes que pueden enviarse, el canal constituye el medio físico por el que se transmiten las señales, los codificadores convierten los mensajes en señales y los descodificadores realizan la operación inversa. El libro de códigos es el conjunto de reglas necesarias para traducir la señal en mensaje y viceversa. El ruido corresponde a las alteraciones que sufre la señal durante la transmisión.

de transmisión, las cuales pueden provocar que el descodificador obtenga un mensaje erróneo. Existen ejemplos de todo tipo: la niebla que impide la comunicación por semáforos de bandera entre navíos, la degradación de la señal eléctrica en una transmisión telegráfica, los rayos de tormenta que distorsionan las señales de radio, un disco compacto rayado que no puede reproducirse o el ruido acústico que dificulta una conversación verbal.

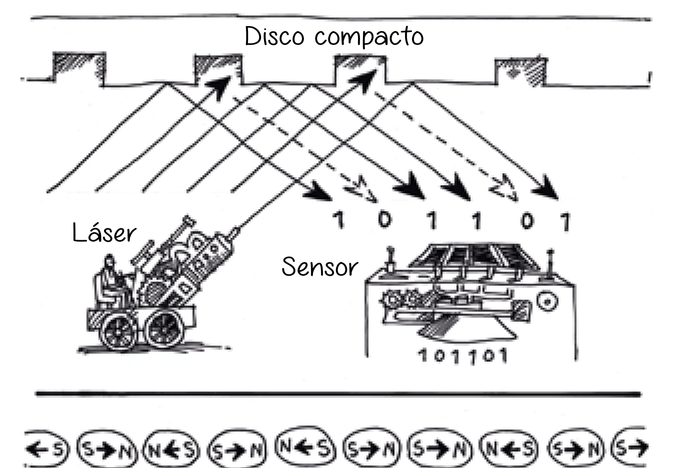
En la teoría de la comunicación, codificación no equivale a cifrado. Este último constituye un paso extra que convierte el mensaje original en un criptograma antes de que sea codificado y transmitido. De esta manera, quienes no posean las claves apropiadas no podrán reconstruir el mensaje original. El objetivo de un sistema de comunicación consiste en transmitir, con la máxima precisión posible, el criptograma al destinatario, quien luego podrá leerlo si dispone de las claves adecuadas.

En su artículo de 1948, Shannon introdujo el término bit (contracción de *binary digit* —«dígito binario»— propuesta con anterioridad por John W. Tukey) para describir la unidad básica de información. Esta puede representarse en forma de bits tras someterla a un proceso de digitalización, o conversión de la información analógica en digital. Ello no siempre da como resultado una réplica exacta de la información analógica; en ocasiones, una parte de ella puede perderse en el proceso. Algunos ejemplos resultan obvios, como las fotos pixeladas con contornos borrosos. Otros son menos evidentes. Ciertas cantidades físicas, como la posición de una sonda espacial que se aproxima a Marte, no pueden representarse con una precisión infinita en una computadora. En algunas ocasiones, los errores de redondeo pueden acumularse y comprometer la exactitud del cálculo. En otras, las operaciones pueden incrementar la magnitud del error, como ocurre cuando la diferencia entre dos números casi idénticos se redondea a cero y, después, esta cantidad se emplea como divisor. Con el tiempo, los programadores han concebido todo tipo de artimañas para evitar que tales desviaciones arruinen los resultados.

Pero, tal y como puntualizara Shannon, no todos los sistemas de comunicación sufren errores durante el proceso de digitalización. Cualquier señal continua con un ancho de banda determinado puede digitalizarse sin pérdida de información si se la muestrea al doble de su frecuencia máxima. Los discos compactos de audio, por ejemplo, registran 44.000 muestras por segundo sin ninguna pérdida apreciable de calidad, ya que el oído humano no puede percibir sonidos de frecuencia superior a los 22.000 hercios.

La información es real y observable en todos los sistemas de comunicación. Un bit no constituye más que una abstracción útil para precisar las operaciones que deseamos ejecutar, pero todos sus componentes son físicos. Y toda información se codifica en algún tipo de señal, la cual puede ser transmitida y traducida sin pérdidas.

Dado que la información siempre queda registrada en un medio físico, hemos de invertir energía y tiempo en escribirla, transformarla y leerla. La comunicación y la computación jamás podrán librarse de las restricciones que impone el mundo físico. Los ingenieros saben que la acumulación de calor y el



Información real: La información siempre existe como un patrón en un medio físico. Los símbolos «0» y «1» no son más que etiquetas para describir los dos posibles estados de un sistema. Cuando un haz láser barre la superficie de un disco compacto (*arriba*), la reflexión en las zonas lisas es convertida por un sensor en un «1»; las muescas representan el estado complementario, «0». En el disco duro de un ordenador (*abajo*), los datos binarios se almacenan en la magnetización de las partículas que componen la superficie del disco.

TODAS LAS ILUSTRACIONES: SIGMA XI/*AMERICAN SCIENTIST*

tamaño medio de las unidades que componen sus microprocesadores limitan la miniaturización de los circuitos. Además, el tiempo que lleva realizar una operación impone límites a la velocidad de procesamiento. Aunque los grandes avances de los últimos años han permitido mejorar de manera notable la resolución de problemas comunes, otros continúan siendo intratables. Como ejemplo, valga mencionar que incluso el más rápido de los ordenadores actuales tardaría siglos en hallar los dos factores primos de un número de 600 dígitos (la clave del popular sistema de criptografía RSA).

Nuestra habilidad para almacenar y procesar información ha aumentado de forma exponencial durante las últimas décadas. El mismo año en que Shannon publicó su ensayo —y en el mismo sitio, los laboratorios Bell—, el recién inventado transistor comenzó a reemplazar a las lámparas de vacío en los ordenadores. Dieciocho meses más tarde, los ingenieros lograron reducir el tamaño de los transistores y acomodar el doble de ellos en el mismo espacio y por el mismo coste. Esa hazaña ha venido repitiéndose durante el último medio siglo, lo que ha permitido multiplicar por cien la potencia de cálculo cada diez años. Esta deriva ha sido bautizada como ley de Moore en honor al cofundador de Intel Gordon Moore, quien la propuso en 1965.

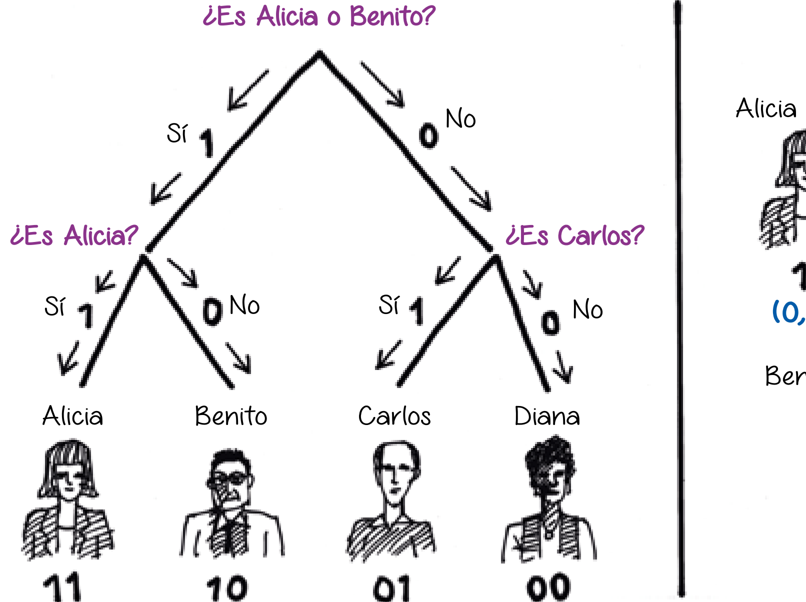
La ley de Moore ha traído consigo dos consecuencias. La primera, la descomunal potencia de cálculo de la que disponemos hoy, que habría parecido cosa de magia a los pioneros de la informática de los años cuarenta. La segunda, el «diluvio de información», como lo llama James Gleick en su libro de 2011 *The information: A history, a theory a flood*. El primer resultado afecta a la acumulación y transmisión de información; el segundo, a la noción de significado en nuestras vidas.

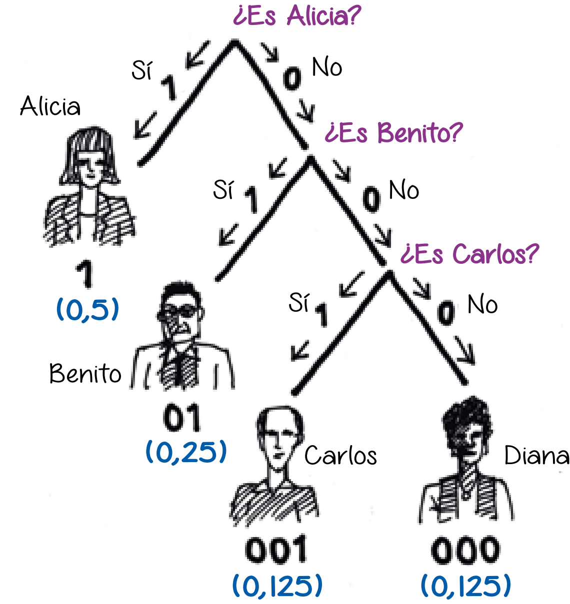
Semejante aumento en la capacidad de procesamiento ha fomentado la creencia popular de que, dado que las computadoras manipulan bits etéreos y no átomos, su potencia de cálculo crecerá sin límite. Nada más lejos de la realidad. Un bit abstracto no puede hacer nada hasta que no se lo almacena en un medio físico. Y esto nos lleva de nuevo al mundo de los átomos: sin ellos, no hay cálculo posible. Podremos seguir miniaturizando los circuitos y aumentando la velocidad de procesamiento y transmisión de la información, pero jamás podremos eliminar por completo su coste en tiempo y energía.

MEDIR LA INFORMACIÓN

Shannon buscaba un método para medir la información inherente a una fuente. El número de bits de un código no sirve a tales efectos, ya que una misma fuente puede representarse mediante códigos de diferente longitud. El matemático e ingeniero deseaba saber cuál era el código más corto posible para transmitir una serie de mensajes.

Shannon rechazó las medidas que dependen del significado que un observador humano asigna a una señal. En su lugar, se centró en los mecanismos que usamos para codificarla, transmitirla y descodificarla, con independencia del contexto. El servicio de correos ha empleado siempre un principio similar: sus sistemas de distribución y entrega son ajenos al contenido de los sobres. La idea genial de Shannon consistió en equiparar la recepción de información con la disminución de incertidumbre. Dado el conjunto de todos los mensajes que puede enviar una fuente, definió la información como el número mínimo de preguntas de tipo «sí» o «no» necesarias para determinar de qué mensaje se trata. Por tanto, cuanto más sabemos sobre lo que una fuente puede enviar, menos información obtenemos al recibir un mensaje.





Información e incertidumbre: Shannon definió la cantidad de información contenida en un mensaje a partir del número de preguntas de tipo «sí» o «no» necesarias para identificar dicho mensaje entre todos los posibles de la fuente. Cada pregunta reduce la incertidumbre inicial. Es costumbre designar los mensajes como «Alicia», «Benito», etcétera, de acuerdo con las letras del alfabeto. Usando un simple árbol de decisión (*izquierda*), preguntamos primero si se trata de Alicia o Benito. Si la respuesta es «sí», una sola pregunta adicional (¿es Alicia?) nos dará la respuesta. El código para cada mensaje se basa en las respuestas que conducen a él. Si además sabemos la probabilidad con la que puede emitirse cada uno (*en azul, a la derecha*), podemos usar un código gradado: a Alicia, que representa el mensaje más probable, le asignamos el código «1»; al siguiente mensaje más probable (Benito), le asignamos un código de dos bits («01»); a Carlos y Diana se les adscriben códigos de tres bits.

Adición de 1 bit

Alicia 110 · Benito 101 · Carlos 011 · Diana 000

Adición de 3 bits

Alicia 11111 · Benito 10010 · Carlos 01001 · Diana 00100

Corrección del ruido: Los códigos cortos pueden sufrir alteraciones con facilidad por efecto del ruido. Un solo error en un código de dos bits puede modificar el mensaje. Para alertar al receptor se usan bits de paridad. A la izquierda, un bit de paridad (*rojo*) impone que todos los mensajes contengan un número par de unos. Así, un error daría como resultado un mensaje con un número impar de ellos, un patrón detectable por el receptor. Con tres bits de paridad (*en verde, a la derecha*), un error en un bit hace que el mensaje se diferencie en un bit del mensaje correcto, pero en dos o más bits de cualquier otro mensaje posible. Ello permite no solo detectar el error, sino corregirlo.

Imagine que sabe que alguien va a contestar una pregunta con un «sí» o un «no», pero desconoce qué respuesta dará. Su incertidumbre terminará una vez que su interlocutor replique «sí» o «no». Shannon diría que esa persona le está proporcionando un bit de información (0 o 1), el cual selecciona una de las dos respuestas. Cuando hay más de dos posibilidades, necesitamos más bits para distinguir el mensaje.

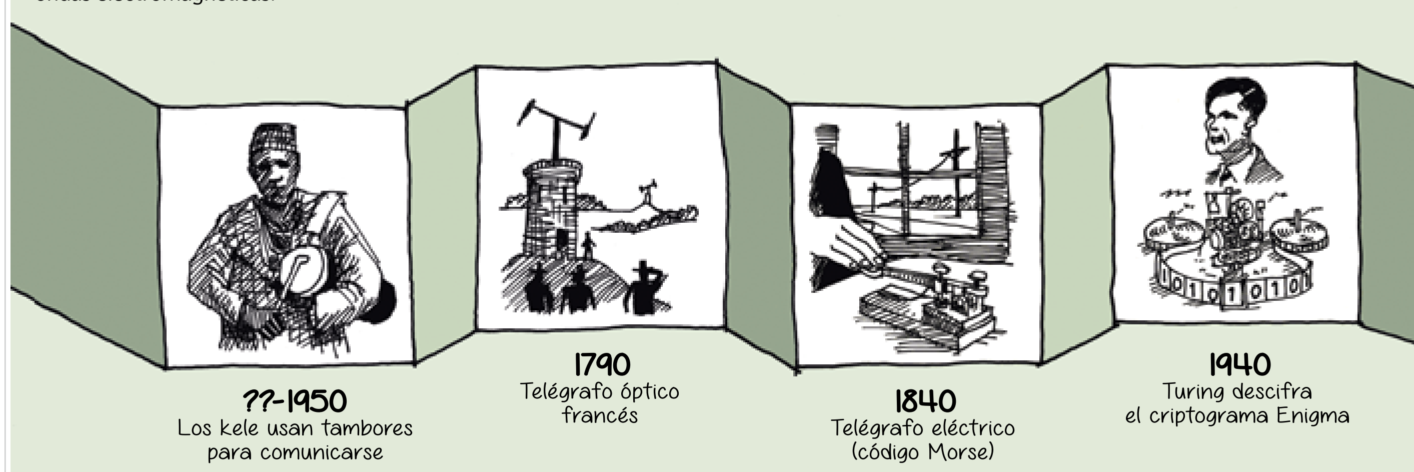
A modo de ejemplo, supongamos que nos proponemos localizar la página del listín telefónico que contiene el nombre de un amigo. ¿Cuántos bits necesitaremos para codificar esa información? Podemos calcularlo con el siguiente método. Abrimos la guía por la mitad y nos preguntamos en cuál de las dos partes del listín se encuentra el nombre (lo cual es sencillo, ya que las entradas siguen un orden alfabético). Repetimos el proceso con la mitad seleccionada y nos formulamos la misma pregunta. Al final, solo quedará una página, por lo que el nombre de nuestro amigo deberá figurar ahí. Una misma pregunta («¿en qué mitad?») repetida varias veces nos conduce con rapidez a la solución. Si el listín posee 512 páginas, tras el primer paso tendremos 256 páginas; después, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2 y, por último, nos hallaremos ante la página buscada. Necesitamos nueve preguntas para encontrarla. De esta forma, conocer en qué página se halla el nombre de nuestro amigo equivale a recibir 9 bits de información.

Al construir un código hemos de tener en cuenta la probabilidad con la que aparecen los distintos mensajes. Samuel Morse, coinventor del telégrafo y diseñador del código homónimo, asignó el código más corto (un punto) a la letra E, pues sabía que esta era la más frecuente en lengua inglesa (aparece en torno a un 12 por ciento de las veces). También asoció uno de los códigos más largos a la J, que solo se presenta en un 0,15 por ciento de las ocasiones. Dicha elección minimizaba la longitud media

HISTORIA DE LA INFORMACIÓN

De los tambores a la era de Internet

Podemos pensar en los sistemas de comunicación como producto del avance tecnológico. Sin embargo, como explica James Gleick en *La información* (Crítica, 2012), existen precedentes en la era preindustrial. Gleick pone como ejemplo al pueblo kele, un grupo étnico de la República Democrática del Congo cuyos miembros emplean tambores para producir sonidos que imitan el habla y comunicarse a grandes distancias. Las tropas de Napoleón usaban señales luminosas para enviar mensajes cifrados. Samuel Morse, coinventor del telégrafo, concibió un código para enviar señales a lugares remotos. Poco después, Gugliemo Marconi y otros muchos comenzaron a utilizar las ondas electromagnéticas.



de los mensajes. Así pues, vemos que las preguntas que debemos formular para identificar un mensaje pueden servir para definir el código. Por otro lado, un conocimiento previo de la probabilidad con la que ocurre cada mensaje puede aprovecharse para elaborar códigos de menor longitud.

Supongamos que disponemos de una serie de palabras de longitud L_i, cada una de las cuales cuenta con una probabilidad P_i de aparecer en un mensaje. La longitud media del código vendrá dada entonces por:

$$L = \sum_i (L_i \cdot P_i) .$$

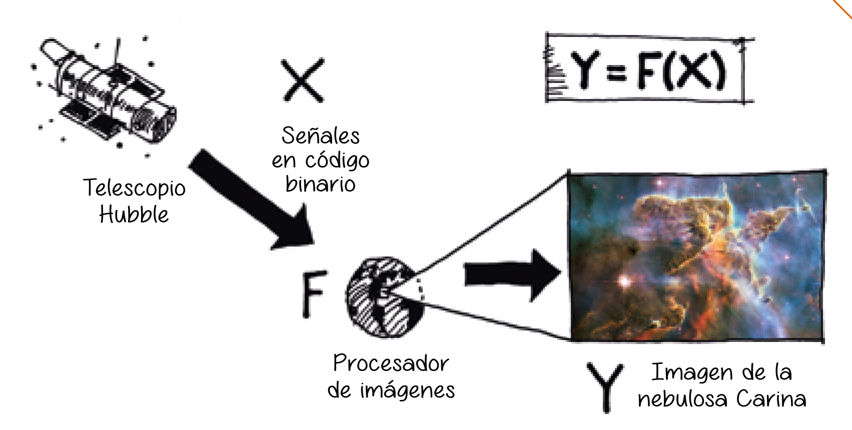
(Para los ejemplos de la figura de la página 35, esta ecuación nos dice que la longitud media del primer código asciende a 2 bits, y la del segundo, a 1,75 bits.)

¿Cuánto mide la longitud media de las palabras si empleamos el código óptimo, aquel que minimiza L? Shannon respondió a esta pregunta en un apéndice de su artículo de 1948. En él demostró que la longitud óptima de una palabra era a $-\log(P_i)$; es decir, menos el logaritmo en base 2 de la probabilidad con la que aparece dicha palabra. Por tanto, la longitud media del código óptimo ascenderá a:

$$L_{\text{opt}} = -\sum_i (P_i \cdot \log P_i) .$$

Desde un punto de vista formal, la ecuación anterior coincide con la expresión de la entropía termodinámica de un sistema. Posee también una interpretación similar. La entropía proporciona una medida del desorden, o de nuestra incertidumbre sobre el estado en que se halla un sistema físico. Cuanto más desordenado se encuentre un conjunto de estados, mayor será su entropía. El máximo desorden posible se alcanza cuando todos los estados cuentan con la misma probabilidad; el mínimo, cuando podemos afirmar con certeza que el sistema se halla en un estado concreto (y que todos los demás, por tanto, poseen una probabilidad nula).

Shannon consideró que la entropía proporcionaba una medida de la información de la fuente. Una fuente corresponde a un conjunto de mensajes posibles, cada uno de los cuales puede ocurrir con cierta probabilidad. La entropía, que solo depende de la probabilidad con la que aparecen los mensajes (y no de su longitud en un código u otro), nos proporciona

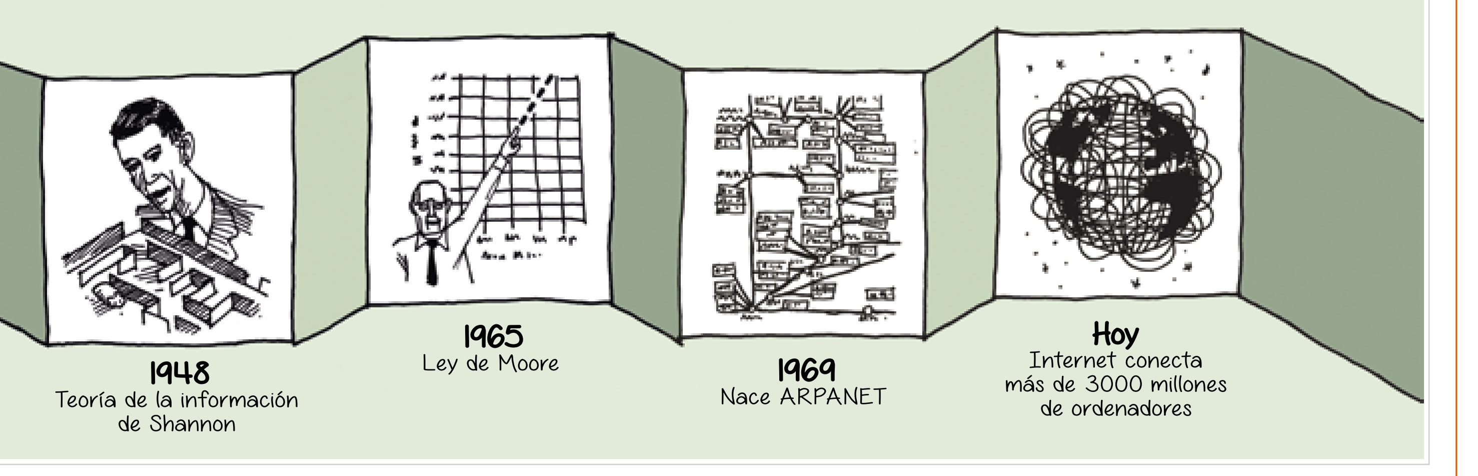


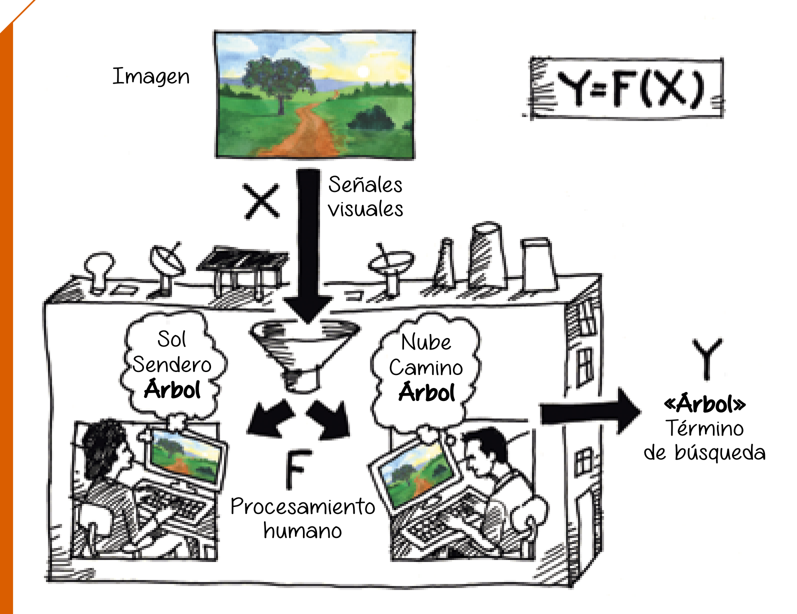
Interpretación de códigos: El telescopio espacial Hubble codifica teraoctetos de datos y los transmite a la Tierra, donde después se procesan para elaborar imágenes del universo. La teoría de la computación caracteriza el proceso por medio de una función *f* aplicada a los datos de entrada *x*. La máquina que implementa la función, las señales enviadas y las imágenes resultantes no dependen del significado de la información. Aun así, los humanos interpretamos el resultado como una bella imagen de la nebulosa Carina.

CORTESÍA DE LA NASA (*nebulosa Carina*)

Hacia los años cuarenta, las señales telefónicas y de radio ya usaban técnicas de muestreo digital. Durante la Segunda Guerra Mundial, Alan Turing se valió de una computadora rudimentaria para descifrar el criptograma Enigma del Ejército alemán. En 1948, Claude Shannon desarrolló un marco teórico para tratar la codificación y descodificación de señales. Con ello, sentó las bases de la teoría de la información.

En 1965, Gordon Moore formuló la ley homónima, la cual predecía un crecimiento vertiginoso en la potencia de cálculo durante las siguientes décadas. La creación de ARPANET a manos del Departamento de Defensa de EE.UU. derivaría después en el nacimiento de Internet. En 1970 había 4 ordenadores conectados; en 1981, 213 nodos. En la actualidad, Internet conecta más de 3000 millones de ordenadores.





Humanos y máquinas: En un artículo de 2004, Luis von Ahn y Laura Dabbish, de la Universidad Carnegie Mellon, propusieron un novedoso juego de ordenador para etiquetar imágenes. En él se muestra una imagen a dos participantes, quienes deberán describirla. El objetivo consiste en teclear una palabra que también use el compañero. El término común se convertirá en una nueva etiqueta que caracterizará la imagen en futuras búsquedas. El juego emplea humanos y máquinas para calcular una función (el etiquetado de imágenes) que nadie sabe cómo programar en un ordenador. Como cualquier otra, esta función también transforma la información, pero el significado que añaden los jugadores cumple una función esencial en dicha transformación.

el tamaño medio del código óptimo. Por tanto, cualquier código más corto dará como resultado mensajes ambiguos, los cuales no podrán ser descodificados de la manera adecuada.

Considere el siguiente código:

A: 1, B: 0, C: 01, D: 10,

en el que los mensajes poseen probabilidades respectivas 0,5; 0,25; 0,125 y 0,125. Podrá comprobar que su longitud media asciende a 1,25 bits. Sin embargo, la fórmula de Shannon nos dice que la longitud del código óptimo es 1,75, por lo que el código anterior debería ser ambiguo. Y de hecho lo es: si un destinatario recibe 1001, no podrá determinar si se trata de ABBA, ABC, DBA o DC. (En cambio, con el código de la figura de la página 35, de longitud 1,75, 1001 solo puede corresponder a AC.) La entropía de los mensajes, calculada a partir de la fórmula de Shannon, marca por tanto la frontera entre códigos ambiguos y precisos.

Una manera equivalente de presentar el mismo resultado consiste en decir que la entropía define qué canales resultan fiables y cuáles dudosos. Si una fuente envía un mensaje cada T segundos y el código óptimo posee longitud L, la fuente requerirá un mínimo de L/T bits por segundo. Si el ancho de banda del canal asciende a L/T o más, todos los bits enviados por la fuente llegaran al receptor. En caso contrario, algunos bits se perderán y el destinatario no podrá reconstruir el mensaje original.

En 1951, David Huffman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, diseñó un algoritmo para generar un código de longitud mínima a partir de la probabilidad asociada a cada mensaje. Dicho método produce códigos cuya longitud media solo difiere en un bit con respecto al umbral que dicta la entropía de Shannon. En los ejemplos de la figura de la página 35, el algoritmo de Huffman genera el primer código cuando los mensajes son equiprobables y el segundo cuando cada mensaje aparece con la probabilidad indicada.

Otra de las aplicaciones más importantes de la teoría de la información consiste en la compresión de datos, el diseño de métodos para reducir el espacio de almacenamiento y el tiempo de transmisión. Por ejemplo, la mayoría de los ordenadores usan códigos de tamaño fijo para representar un texto. Estos ficheros pueden reducirse aproximadamente a la mitad de su tamaño original mediante la identificación de secuencias de caracteres que se repiten. Los formatos ZIP y RAR emplean esta estrategia. Tales formatos proporcionan una compresión sin pérdidas; es decir, el fichero original puede recuperarse con exactitud.

Otros métodos ofrecen factores de compresión mucho mayores, pero a costa de una serie de pérdidas. El formato MP3, por ejemplo, reduce el tamaño de un fichero en un factor diez gracias a que descarta frecuencias inaudibles para la mayoría de las personas. El formato JPEG de compresión de imágenes elimina bits que codifican colores que el ojo humano distingue con dificultad. Estas técnicas suponen una ventaja para todo tipo de actividades, como la venta de DVD, películas y música. Dada la gran reducción del tamaño de los archivos, las pequeñas pérdidas asociadas a tales métodos se consideran un compromiso asumible.

TRANSFORMAR LA INFORMACIÓN

Un sistema de comunicación puro se limita a transmitir la información. Sin embargo, la mayoría de los sistemas informáticos hacen mucho más: la transforman. Ello abre la puerta a todo tipo de posibilidades; en particular, a la creación de nueva información.

Las transformaciones simples incluyen calcular el cuadrado de un número, obtener una cantidad determinada de decimales de π u ordenar una serie de números en orden creciente. En cada uno de estos casos, partimos de un patrón de información de entrada y obtenemos uno distinto a la salida. En términos matemáticos, una transformación es realizada por una función. Cualquier función que pueda programarse en un ordenador recibe el nombre de computable. Uno de los requisitos para que una función sea computable reside en que esta finalice la transformación encomendada en un tiempo finito; es decir, sin quedar atascada para siempre en un bucle.

Un ordenador combina funciones computables y canales de comunicación. Un canal lleva la secuencia de entrada a la maquinaria del ordenador que calcula la función, mientras que otro conduce la secuencia de salida hasta su destino. En estos casos no se añade nueva información; solo se transforma. Con todo, una función puede convertir una entrada muy sencilla en una salida con un gran número de dígitos. Una función que calcule los primeros dígitos de π, por ejemplo, generará 900 dígitos como respuesta a la entrada «900». La teoría de la información nos dice que todos esos dígitos no constituyen información extra; pero, para no pocas personas, pueden representar información nueva y útil. Otras transformaciones, como promediar u ordenar, pueden también proporcionar información nueva al

observador, incluso cuando el número de bits en la salida sea muy inferior a la cantidad de dígitos de entrada.

Un ordenador es una máquina controlada por un programa de instrucciones. Tanto el programa como los datos vienen dados por secuencias de bits; es decir, por información. Por tanto, una computadora emplea información para transformar información. Este sencillo hecho impone dos grandes límites a la clase de tareas que un ordenador puede ejecutar.

En primer lugar, Alan Turing demostró en 1936 que existen funciones que ningún ordenador puede calcular. El ejemplo de Turing era el problema de la parada: no existe ningún programa capaz de determinar con certeza si otro programa quedará atascado o no en un bucle infinito. Un ejemplo más cercano lo hallamos en la detección de programas dañinos. Resulta imposible determinar con total fiabilidad si un programa es portador de código maligno o no. La existencia de funciones no computables constituye una limitación que emana de las características inherentes a la información misma. Pero, por otro lado, dado que toda información requiere un soporte físico, nos enfrentamos a las limitaciones derivadas del consumo de tiempo y energía. Numerosas funciones computables requieren tales cantidades de uno y otra que, en la practica, jamás producirán una respuesta. Un excelente ejemplo lo hallamos en la factorización de una clave cifrada en RSA: una función computable, pero intratable en la práctica.

Pero incluso si nos limitamos a estudiar funciones computables y manejables aparecen cuestiones de interés. Cuando una función calcula bits que nunca antes hemos visto, ¿constituyen estos nueva información, o se reducen a una consecuencia de la información existente? ¿Contiene el ADN información? No pocos biólogos afirmarían que sí. Si se trata de un mensaje, ¿quiénes son la fuente y el receptor? Si descodificamos el ADN, ¿ganamos información? La secuenciación del ADN puede emplearse para tratar una enfermedad o para identificar al autor de un crimen. ¿Comparar ADN con una base de datos solo revela información oculta o, por el contrario, genera nueva información? La teoría clásica de la información no ofrece ninguna respuesta a estas preguntas.

SISTEMAS INTERACTIVOS

Pero numerosos sistemas informáticos hacen mucho más que calcular simples funciones: reciben nuevos datos de entrada y generan nuevos datos de salida en numerosos puntos, a menudo de manera indefinida. Estos sistemas interactivos, como se les conoce, son hoy ubicuos: el sistema operativo de cualquier ordenador, el GPS de un automóvil, Facebook, o un servidor para comercio en línea. Internet constituye un sistema interactivo global para intercambiar datos y coordinar acciones. También el sistema de nombres de dominios (DNS) pertenece a esta clase.

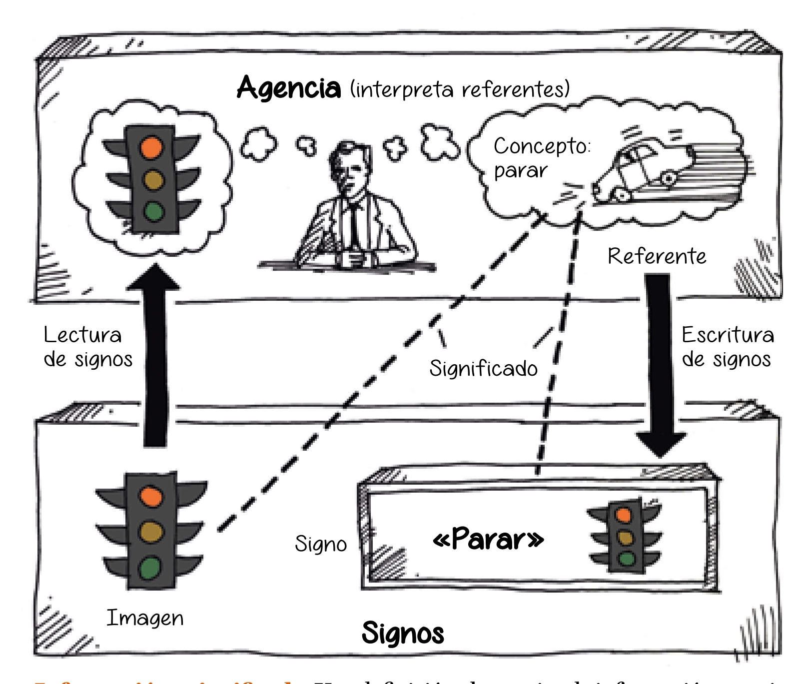
Una característica distintiva de tales sistemas reside en que operan de forma continua. Una función, en cambio, concluye su tarea cuando genera un resultado. En su obra *Juegos finitos y juegos infinitos*, de 1986, el filósofo James Carse empleó numerosas metáforas basadas en el juego para analizar cuestiones del ámbito humano: «Un juego finito se juega para ganar; uno infinito, por el placer de jugarlo». Las funciones son juegos finitos; los sistemas interactivos, juegos infinitos.

Los expertos han debatido durante años si la computación interactiva resulta superior a la computación simple. Desde hace unos años, parecen haber llegado a la conclusión de que la computación interactiva es más poderosa. El gran problema que hoy en día plantea el etiquetado de imágenes digitales, por ejemplo, tal vez ilustre bien por qué. La solución estriba en la interacción de máquinas y humanos. Gracias a ello, resulta posible resolver un problema que ni máquinas ni humanos podían resolver por sí solos. Los sistemas interactivos realizan tareas que ninguna función computable conocida puede ejecutar. Pero ¿cómo logran generar información donde no la había antes?

SIGNOS Y REFERENTES

La computación que no hace referencia al significado funciona bien para los canales de comunicación, pero no como modelo para la computación en general. Nadie paga para participar en el juego en línea *World of Warcraft* solo porque sabe que las señales codificadas por la compañía Blitzard Entertainement se transmitirán con gran fidelidad a la pantalla de su ordenador. Quienes lo hacen desean experimentar qué se siente al matar un dragón en una situación compleja en la que participan también otras personas: pagan por un significado. Un programador diseña esos significados para los usuarios. Lo mismo vale para la ciencia. El CERN no habría invertido miles de millones en el Gran Colisionador de Hadrones si sus expertos creyesen que el resultado carecería de significado.

A principios del siglo xx, Albert Einstein se enfrentó a una aparente contradicción. Las leyes de la física decían que el mo-



Información y significado: Una definición alternativa de información permite incorporar el concepto de significado en la teoría clásica. Toda información consta de un signo, un referente y una asociación entre ellos. Dicho vínculo constituye el significado. La «agencia» corresponde a un organismo (o una máquina de alto nivel) que aporta el significado que el ordenador que almacena el signo no puede proporcionar. Esta definición permite la coexistencia de signos carentes de significado y referentes con significado.

vimiento solo podía definirse con relación a un observador. Por otro lado, el experimento de Michelson y Morley demostró que la velocidad de la luz no dependía del movimiento del observador. La solución de Einstein, que hoy conocemos como teoría de la relatividad, postulaba que ambos aspectos, aparentemente contradictorios, eran ciertos: el movimiento solo cobra sentido si se lo define con respecto a un observador, y la velocidad de la luz permanece constante en todos los sistemas de refencia. ¿Podemos aplicar la idea de «aspectos contradictorios pero ciertos a la vez» para reconciliar las nociones objetiva y subjetiva de la información?

En un estudio de 2010 sobre gran cantidad de señales y máquinas, Paolo Rocchi, de IBM, elaboró un modelo que acomodaba los aspectos objetivo y subjetivo de la información: esta consta siempre de dos partes, signo y referente. El significado es el vínculo entre ambos. Ello provee la base para la reconciliación.

La asociación entre signo y referente puede almacenarse en nuestro cerebro. Cuando vemos el signo, sabemos lo que significa. Si se nos presenta una luz roja (signo), nuestro cerebro ordena parar (referente). Este vínculo también puede escribirse como una secuencia: *luz roja, parar*. Una vez anotada, la asociación puede ser transformada o procesada por una máquina, y un robot podrá emplear el patrón *luz roja, parar* para conducir.

En ocasiones, describir un referente no resulta obvio. Hace algunos años, se pensaba que solo el cerebro humano podía reconocer un rostro; una tarea antaño imposible para un ordenador. Pero después aprendimos a describir un rostro mediante una combinación de rasgos identificables en una imagen digital, así como a formular una asociación entre dichos rasgos y el nombre de una persona. En la actualidad, los ordenadores ya pueden reconocer rostros. La evolución de la ciencia ilustra el desarrollo de nueva información. Cuando entendemos un fenómeno, podemos describir un vínculo entre sus signos y sus efectos, y podemos programar a una máquina para que busque ejemplos de tales asociaciones.

Al ignorar el significado, la teoría de Shannon se revela incapaz de explicar el origen de nueva información. Pero, según el modelo de Rocchi, el vínculo entre un signo y un referente constituye información nueva. Tim Barnes-Lee, en su libro *Tejiendo la Red* (2000), propone algo similar acerca de Internet: quien crea un enlace nuevo genera nueva información y nuevo significado.

El modelo de signo y referente explica también qué significa que un programa de ordenador produzca un resultado que nunca antes hemos visto. Imagine que se nos da una secuencia de pares de entrada y salida (x,y) correspondientes a los resultados pasados de cierto experimento. Mediante una regresión estadística, podemos calcular los parámetros a y b de la recta que mejor describa los datos: $y = ax + b$. Después, podremos predecir la salida y correspondiente a una determinada entrada x. Por tanto, el resultado del programa consiste en una descripción formal de los puntos de una recta. Y su significado estriba en que dicha recta representa una tendencia en los datos que puede usarse para hacer predicciones.

La inferencia bayesiana proporciona un método mucho más refinado de analizar los datos. Nos dice que la probabilidad de que cierta hipótesis H sea cierta dado cierto indicio I puede calcularse a partir de la probabilidad de I si H es cierta, la probabilidad de H y la probabilidad de I. Supongamos que un médico que desea saber la probabilidad de que un paciente con dolor de cuello sufra encefalitis. La inferencia bayesiana le permite calcularla a partir del número de pacientes con encefalitis que tienen dolor de cuello, la probabilidad de que una persona padezca encefalitis y la probabilidad de que sienta dolor de cuello. Los programas de inferencia bayesiana constituyen una herramienta muy común en los procesos de análisis de grandes cantidades de datos, ya que a partir de ellos pueden inferir hipótesis complejas.

Desde el punto de vista de la teoría clásica de la información, diríamos que la inferencia bayesiana funciona porque determina el contenido de mensajes de una fuente a partir de datos suministrados por esta. Para Shannon, que estaba interesado en la comunicación de mensajes, parecía razonable suponer que el contenido de una fuente era conocido a priori. En el ámbito del descubrimiento científico, sin embargo, se parte de una situación en la que se ignoran las posibilidades inherentes a la fuente; es el descubrimiento lo que las hace aflorar. La inferencia bayesiana proporciona un método automático para transformar datos procedentes de una fuente en conocimiento acerca de su contenido; es decir, en nueva información.

EL FIN DE LA PARADOJA

Los seres humanos hemos codificado y transmitido señales a través de todo tipo de canales desde tiempo inmemorial. En los años cuarenta, la teoría de la información de Shannon permitió diseñar sistemas de comunicación digital fiables que evitasen las pérdidas de información y que corrigiesen los errores derivados del ruido.

Mientras nuestra habilidad para almacenar información crecía de manera exponencial, de acuerdo con la ley de Moore, han aumentado los incentivos para averiguar qué significa la información. Pero, por su propia naturaleza, la teoría de la información de Shannon no puede responder a esa pregunta. ¿Es nueva la información que vemos por primera vez, o se limita a una mera reelaboración de la información de partida? ¿Cómo puede un sistema procesar información sin tener en cuenta su significado y, al mismo tiempo, generar significado cuando el usuario interpreta dicha información?

La idea de que la información consta de signo y referente resuelve la paradoja. La asociación entre ambos conceptos constituye nueva información. Mediante los vínculos que creamos en la Red y los resultados que nos proporcionan nuestros programas, generamos cantidades ingentes de información a la que asignamos significado. La interpretación basada en signo y referente reconcilia esta realidad con la teoría de la información. Y nos permite homenajear a los programadores, pues gracias a ellos podemos dotar de significado al resultado de sus programas.

PARA SABER MÁS

The mathematical theory of communication. Claude Shannon en *Bell Systems Technical Journal*, vol. 27, págs. 379-423, 623-656, 1948.
Tejiendo la Red: El inventor de la World Wide Web nos descubre su origen. Tim Berners-Lee. Siglo XXI de España Editores, 2000.
Interactive computation: The new paradigm. D. Goldin, S. Smolka y P. Wegner. Springer Verlag, 2010.
Logic of analog and digital machines. Paolo Rocchi. Nova Publishers, 2010.
La información: Historia y realidad. James Gleick. Editorial Crítica, 2012.
Computer Science Unplugged. Proyecto educativo en ciencias de la computación: **csunplugged.org**

Jérôme Segal es profesor de historia de la ciencia y epistemología en la Universidad de París IV-Sorbona. Actualmente coordina de la escuela doctoral de historia y filosofía de la ciencia de la Universidad de Viena.



Hacia una teoría universal

POUR LA SCIENCE

Las sucesivas aplicaciones de la teoría de la información a nuevos campos, como la biología, revelan una disciplina joven que aún debe superar numerosos retos

Jérôme Segal

REPETIMOS UNA Y OTRA VEZ QUE VIVIMOS EN LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN, QUE LOS ordenadores manipulan la información, que la información nos desborda. Pero ¿encierra el término un significado preciso? ¿Representa un concepto científico universal y unificado? ¿Es correcto su empleo en diversos dominios, desde la física hasta la economía, pasando por la biología y la robótica?

Podemos sentirnos tentados a pensar que el concepto de información es ambiguo, un cajón de sastre. Pero se trata de algo más que eso. Sabemos cuantificar la información, al menos en algunos contextos, y cada vez más físicos la consideran una variable fundamental, como la energía o el tiempo. Pero hablamos de un concepto multiforme que no resulta fácil de aprehender. La teoría científica de la información no cuenta más que unas décadas, y el concepto mismo de información aún suscita debates entre filósofos y científicos. Hoy por hoy, la disciplina se muestra como un edificio inacabado y heterogéneo.

Para comprender mejor el lugar que la noción científica de información ocupa en la actualidad, resulta útil remontarse a sus orígenes, allá por los años veinte. Estos nos revelan que, aunque hablemos de ella en singular, la teoría de la información hunde sus raíces en campos muy diversos y que, a pesar de su carácter inacabado, ha impregnado múltiples ámbitos de la actividad y el pensamiento humanos. También ha desempeñado un papel relevante en la evolución de varias ciencias, como la biología molecular, dominada desde mediados del siglo xx por el enfoque genético. En el dominio de las ciencias humanas y sociales, teorías como el estructuralismo o algunas concepciones neoliberales de la economía se apoyan asimismo en una noción esencialista de la información.

Una de las aplicaciones directas de la teoría de la información se halla en el progreso ligado a la codificación y transmisión de mensajes mediante líneas de comunicación. Ello ha desempeñado una función clave en los avances recientes que han transformado nuestras vidas. Las innovaciones de la era digital (ordenadores, transmisión y edición de textos e imágenes, Internet, etcétera) nos han familiarizado con la representación de la información en secuencias de ceros y unos, en bits. Como ejemplo gráfico de tales secuencias, valga mencionar las líneas paralelas de los códigos de barras o los píxeles blancos y negros de los códigos de respuesta rápida (QR).

Todos esos desarrollos, cuyas consecuencias aún no hemos tenido tiempo de experimentar por completo, se remontan a una serie de disciplinas que comenzaron a situar en el centro de sus reflexiones dos textos científicos: el artículo «Una teoría matemática de la comunicación», publicado en 1948 por el matemático e ingeniero estadounidense Claude Shannon, y el libro *Cibernética, o el control y comunicación en animales y máquinas*, escrito en el mismo año por el también matemático estadounidense Norbert Wiener.

Los códigos de respuesta rápida (QR), inventados en 1994 por la compañía japonesa DensoWave, suelen dirigir a una página de Internet. Los teléfonos modernos pueden leerlos y descodificarlos con rapidez. Compuestos por píxeles blancos y negros, un código QR puede representar hasta 4296 caracteres alfanuméricos. Las tres esquinas con un cuadrado informan sobre la orientación de la imagen.

MAGNITUD CIENTÍFICA

El concepto de información como magnitud científica nació entre las décadas de 1910 y 1930 en tres áreas muy distintas: física, estadística y la teoría matemáticas de la comunicación. En física, su desarrollo se encuentra ligado al «demonio de Maxwell», un pequeño ente imaginario que conoce las posiciones y velocidades de todas las moléculas de un gas y que utiliza esa

EN SÍNTESIS

La teoría de la información nació en los años cuarenta del siglo pasado en tres áreas dispares: la física, la estadística y las telecomunicaciones.

Hoy su área de aplicabilidad se extiende a numerosas disciplinas, desde la cibernética y la biología hasta algunas ciencias sociales, como la economía.

Debido a su generalidad, el concepto de información ha seducido a numerosos pensadores, pero también ha dado lugar a interpretaciones tendenciosas.

información para separar aquellas que se mueven deprisa de las que lo hacen despacio. De esta manera, a partir de un gas a temperatura uniforme, el demonio obtiene dos regiones a temperaturas distintas.

Si el demonio lograse realizar dicha operación empleando una cantidad ínfima de trabajo, podría violar el segundo principio de la termodinámica, según el cual la entropía de un sistema aislado nunca decrece. La entropía constituye una magnitud fundamental en termodinámica, ciencia nacida durante el siglo XIX (la época de la Revolución Industrial) que permite cuantificar la cantidad de energía que un sistema puede transformar en trabajo. Gracias a Ludwig Boltzmann, hoy sabemos que la entropía puede interpretarse como una medida del desorden de un sistema.

En física estadística, la entropía mide el número de estados microscópicos compatibles con las variables macroscópicas de un sistema dado. En un gas, por ejemplo, un estado microscópico quedaría caracterizado por las posiciones y velocidades de sus partículas. Así, en el caso de un gas que comienza a temperatura uniforme pero que acaba separándose en una región caliente y otra fría, la entropía disminuye, ya que el orden aumenta. Por tanto, el demonio de Maxwell parece violar el segundo principio de la termodinámica. Al reflexionar sobre este problema, Marian Smoluchowski señaló que un aspecto clave reside en el conocimiento que posee el demonio. El físico polaco apuntó que la disminución en la entropía del gas se hallaba relacionada con la obtención de información.

Ese nexo entre entropía e información fue estudiado en 1929 por el húngaro Leó Szilárd. Este calculó cuánto tendría que aumentar la entropía del demonio de Maxwell, como consecuencia del conocimiento adquirido sobre cada molécula, para que el segundo principio de la termodinámica continuase siendo válido. Su resultado fue que la entropía debía aumentar en al menos $k_B \ln 2$ por molécula, donde k_B denota la constante de Boltzmann, la cual relaciona temperatura y energía y cuyo valor asciende a $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ julios por kelvin, y ln2 representa el logaritmo neperiano de 2. (Este resultado, no obstante, se mostraría incorrecto.)

En los años cincuenta, el físico Léon Brillouin continuó dichas investigaciones. Apoyándose en la fórmula para la entropía asociada a la información que Claude Shannon había deducido en 1948 —idéntica a la de la entropía de la física estadística, salvo por el factor k_B—, Brillouin relacionó la información con el concepto opuesto al de entropía, o *neguentropía* (entropía negativa). Esta equivalencia entre entropía e información a un nivel fundamental ha dividido a la comunidad científica. Hoy en día, aún resulta controvertida.






Cuatro de los precursores de la teoría de la información. De arriba abajo: Marian Smoluchowski (1872-1917), Ronald Fisher (1890-1962), Claude Shannon (1916-2001) y Norbert Wiener (1894-1964).

ARS ELECTRONICA (*Shannon*); KONRAD JACOBS (*Wiener*); *POUR LA SCIENCE*

ESPIGAS DE INFORMACIÓN

La estadística también vio nacer una definición científica de información. En 1922, el matemático británico Ronald Fisher, que por entonces trabajaba en la estación agronómica de Rothamsted, buscaba una manera de medir cuánta información aporta una muestra de datos sobre los parámetros que caracterizan su distribución estadística. Fisher lo explicaba así: «El objeto del método estadístico consiste en la reducción de datos. Cuando una colección de datos es tan vasta que resulta ininteligible, estos deben reemplazarse por un número relativamente pequeño de cantidades que los representen de manera correcta; es decir, que contengan, si no toda, la mayor parte de la información pertinente de los datos originales».

Supongamos que la distribución de tamaños de las espigas de maíz sigue una distribución normal, o campana de Gauss. Tales distribuciones se caracterizan por que la fracción de datos con cierto valor x decrece de manera exponencial con el cuadrado de su diferencia con respecto a la media μ; es decir, como $\exp(-(x - \mu)^2)$. (En este caso, x correspondería a la longitud de las espigas y μ, al tamaño medio.) Uno de los problemas principales en estadística consiste en determinar, a partir de la muestra de datos disponibles, los parámetros que caracterizan la ley estadística correspondiente. (En nuestro ejemplo, estos serían el valor medio y la desviación típica, que mide cuán dispersos se hallan los valores en torno a la media.)

En 1925 Fisher cuantificó la información contenida en un muestreo. Más tarde, también él relacionaría el aumento de la entropía con la pérdida de información: «En los procesos irreversibles presentes en la estimación estadística, donde no podemos reconstruir los datos originales a partir de los valores estimados, puede haber una pérdida de información, pero jamás una ganancia», escribió.

COMUNICACIÓN Y CONTROL

Una tercera vía hacia una concepción científica de la información surgió en el ámbito de las telecomunicaciones. En su búsqueda de métodos para aumentar el ancho de banda de las líneas telegráficas, los ingenieros Harry Nyquist y Ralph Hartley, de los Laboratorios Bell, pusieron los ci-

mientos de una teoría matemática de la comunicación. En 1924, Nyquist estableció que, bajo ciertas hipótesis, la velocidad de transmisión de la información resultaba proporcional al logaritmo del número S de señales o símbolos elementales usados en la comunicación (para un código binario, por ejemplo, $S = 2$). En 1928, Hartley definió la cantidad de información contenida en una serie de N símbolos elementales como $N\log(S)$. Cabe señalar que tales consideraciones no dependen del significado o la naturaleza de la información representada por los símbolos.

Durante la Segunda Guerra Mundial, las ideas de Nyquist, Hartley y otros ingenieros e investigadores convergieron en una teoría de la información gracias a los trabajos de Shannon, también científico de los Laboratorios Bell. En 1945, el excéntrico matemático e ingeniero escribió «Una teoría matemática de la criptografía», documento que permaneció clasificado hasta 1957. En él, Shannon comparaba las modificaciones que el proceso de cifrado incorpora en una señal con el ruido inherente a las líneas de comunicación, el cual los ingenieros tratan de minimizar. Shannon definió la cantidad de información (en el caso discreto) como la media logarítmica de las probabilidades de selección de los elementos constitutivos de un mensaje.

Al mismo tiempo que proseguía con sus investigaciones en criptografía, Shannon colaboró en las tareas de automatización de las defensas antiaéreas. En el período de entreguerras, los aviones habían duplicado la altura y la velocidad del vuelo, por lo que los operarios de los radares ya no disponían del tiempo suficiente para comunicarse con la artillería. Para poder transmitir los datos de forma automática, el equipo de Shannon debía hallar una forma adecuada de definir y codificar la información.

Al mismo tiempo, otro grupo de los Laboratorios Bell dirigido por Norbert Wiener investigaba cuestiones de artillería; en concreto, la relación entre las perturbaciones en los dientes de los engranajes y la estabilidad de la línea de tiro. Animado por el ingeniero Julian Bigelow, Wiener consultó al cardiólogo mexicano Arturo Rosenblueth, quien había analizado las alteraciones motoras provocadas por ciertas formas de ataxia, un trastorno que impide coordinar los movimientos de algunas partes del cuerpo.

BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN

En el contexto de la Segunda Guerra Mundial, ese esfuerzo interdisciplinar resultó en una teoría general de los sistemas reguladores que Wiener bautizó en 1947 como cibernética (del griego *kybernetiké*, «pilotar una nave»). En líneas generales, esta trata de analizar los procesos de retroalimentación en cualquier sistema, ya se trate de un organismo o una máquina. El arquetipo de dispositivo regulador es un termostato: este mide la temperatura y, en función del resultado, ajusta su funcionamiento hasta que se alcanza la temperatura deseada.

Después de la guerra, entre 1946 y 1953, una serie de conferencias multidisciplinares organizadas por la Fundación Macy permitieron a Wiener y otros investigadores clasificar los fenómenos de retroalimentación y analizar el papel que la información desempeñaba en ellos. Wiener había definido este concepto de manera similar a Shannon y había establecido la misma analogía con la entropía estadística.

Un bucle de retroalimentación permite activar automáticamente un sistema de regulación mediante mecanismos que actúan en sentido opuesto a sus causas. Esa clase de fenómenos se conocía desde hacía tiempo gracias a dispositivos como las máquinas de vapor o, en biología, los sistemas de regulación de la temperatura o la presión sanguínea. Sin embargo, fue la consideración de que lo que circulaba por esos bucles era información lo que permitió a los cibernéticos construir una teoría abstracta de la regulación.

Shannon participó en esos debates teóricos y filosóficos. En ellos también tomaron parte otros físicos y matemáticos como John von Neumann, biólogos como Max Delbrück (uno de los fundadores de la biología molecular) o antropólogos como Margaret Mead o Gregory Bateson. Los pilares de varias disciplinas científicas fueron reinterpretados a la luz de la cibernética y la teoría de la información.

En el ámbito técnico, la teoría de la información de Shannon ha ejercido todo tipo de repercusiones. Baste pensar en los códigos de corrección de errores, que a día de hoy se usan para proteger la información digital, o en las técnicas de compresión de datos. En lo que se refiere a estas últimas, los trabajos de Shannon y sus sucesores abrieron la puerta al empleo de la redundancia: para almacenar una imagen que muestra un cielo azul

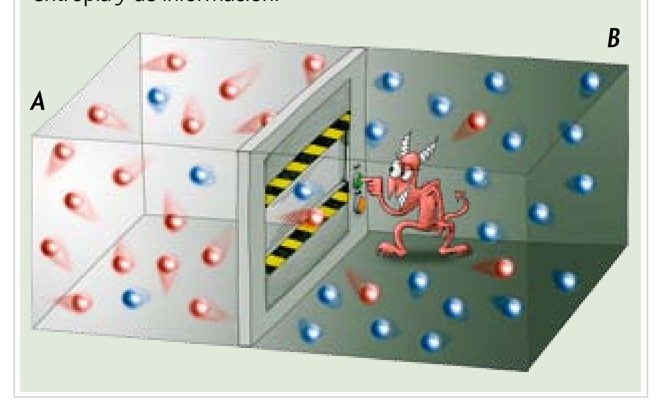
INFORMACIÓN Y TERMODINÁMICA

El demonio de Maxwell

En una de sus formas, el segundo principio de la termodinámica afirma que es imposible transferir calor de un cuerpo frío a uno caliente sin realizar trabajo. En el siglo XIX, James Clerk Maxwell concibió un experimento mental que parecía violar dicho principio.

En una caja separada en dos por un tabique con una pequeña compuerta, situamos a la izquierda un gas caliente (*A*) y a la derecha, un gas frío (*B*). En términos estadísticos, la temperatura proporciona una medida de la velocidad promedio de las moléculas del gas. En 1867, en una carta al científico escocés Peter Tait, Maxwell escribió: «Imaginemos un pequeño ente que, mediante la simple observación, conociese la velocidad y posición de todas las partículas del gas. Este pequeño ser no realizaría trabajo alguno salvo abrir y cerrar la compuerta». Ese pequeño ser podría dejar pasar al compartimento *A* las moléculas que se hallan en *B* y que él identifica como rápidas, y a la inversa, dejar pasar hacia *B* las partículas más lentas de *A*.

«La parte caliente de la caja se tornará más caliente y la parte fría, más fría, sin que se realice trabajo alguno. Solo se requeriría la inteligencia de un pequeño ente observador», concluía Maxwell. En 1874, al comprender la riqueza de este experimento mental y sus posibles extensiones a la teoría de la difusión, William Thomson (lord Kelvin), se refirió a él como «demonio de Maxwell». Este experimento mental ha desempeñado una función clave a la hora establecer una relación entre los conceptos de entropía y de información.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

uniforme, en lugar de registrar el color de cada píxel, un formato de compresión como JPEG utiliza una sintaxis que traduce al lenguaje informático expresiones como «desde este píxel hasta este otro, usa este valor de azul».

MATERIA, ESPACIO, TIEMPO E INFORMACIÓN

Más allá de los servicios que aporta a las tecnologías de la comunicación —el marco en el que Shannon y su escuela cimentaron la teoría de la información—, muchos científicos se han sentido tentados a considerar la información como una entidad fundamental que influye en todos los dominios del saber.

Hace unos veinte años, el físico de IBM Rolf Landauer insistía en el carácter físico de la información. Sostenía que su estatus debía equipararse con el de otros conceptos fundamentales, como el de materia, energía, espacio o tiempo. El físico de altas energías Gilles Cohen-Tannoudji propuso combinar la constante de Planck y la de Boltzmann en una cuarta constante fundamental de la naturaleza relacionada con la información. Esta se situaría a la par que la velocidad de la luz c, la constante de la gravitación universal G y la constante de Planck h. Con ello, pretendía dar cuenta de la importancia de la noción de información en física teórica.

Vlatko Vedral, investigador en la Universidad de Oxford y la Universidad Nacional de Singapur y experto en información cuántica (la disciplina que estudia cómo valerse de los fenómenos cuánticos para manipular, cifrar, codificar o almacenar la información de forma más eficiente), predica una visión aún más radical. Para él todo es información. Y es por tanto en dicho concepto —y no el de energía, espacio o tiempo— donde se esconde la llave para comprender el universo, el cual vendría a ser una especie de ordenador gigante que procesa información.

La teoría de la información también ha llegado a la biología. Durante los años cincuenta, tras el descubrimiento de la estructura helicoidal del ADN en 1953, proporcionó un lenguaje común a los biólogos en sus investigaciones sobre el código genético. Más tarde, numerosos biólogos recurrirían a las ideas de la cibernética sobre la autoorganización para explicar la vida.

Hoy, con el nacimiento de la biología de síntesis y las profundas modificaciones en células vivas que esta implica, estamos asistiendo a un nuevo impulso de la teoría de la información y a todo tipo de cuestiones novedosas. Para comprender cómo funciona una célula, biólogos como Antoine Danchin, uno de los precursores de la genómica bacteriana y fundador de la

INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN

Entropía e incertidumbre

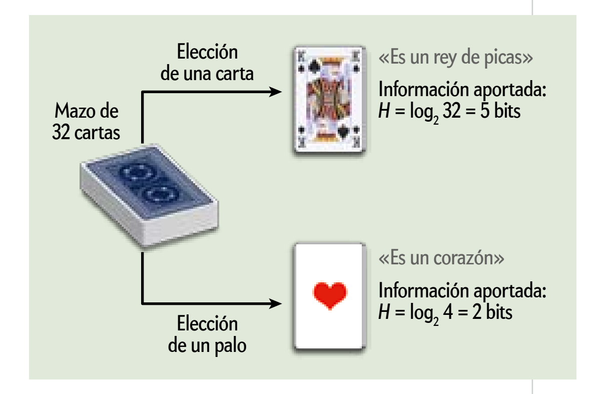
Con el objetivo de definir la cantidad de información contenida en un mensaje construido a partir de un determinado conjunto de símbolos, Claude Shannon intentó cuantificar la incertidumbre, o falta de información, asociada al conjunto de mensajes posibles de la misma longitud y elaborados a partir del mismo alfabeto.

Supongamos que tenemos N mensajes posibles y que la probabilidad de escoger el i-ésimo mensaje viene dada por p_i (de modo que $p_1 + \cdots + p_N = 1$). Shannon buscaba una función $H(p_1, ..., p_N)$ que midiese la incertidumbre asociada a esas posibilidades. Si exigimos que H cumpla una serie de condiciones naturales, puede demostrarse que debe adoptar la forma:

$$H = -K(p_1 \log p_1 + p_2 \log p_2 + \cdots + p_N \log p_N) ,$$

donde K denota una constante positiva por lo demás arbitraria. Esta expresión recibe el nombre de entropía asociada a la información. Cuando solo hay una elección posible (todas las p valen cero salvo una), la incertidumbre es nula. En el caso de que todas las probabilidades tomen el mismo valor ($p_i = p$), tenemos que $H = K\log(1/p)$, correspondiente a la máxima incertidumbre.

Un ejemplo sencillo nos lo proporciona un mensaje con un único símbolo binario: 0 o 1. Si ambas posibilidades son equiprobables ($p_1 = p_2 = 1/2$), la entropía de Shannon toma el valor $H = K\log 2$. Si por comodidad tomamos $K = 1$ y usamos la base 2 para los logaritmos, la entropía asciende a $H = 1$, correspondiente a un bit de información. Del mismo modo, la afirmación «tengo una cita por la mañana» aporta una información de un bit, siempre que exista la misma probabilidad de que la cita tenga lugar por la mañana o por la tarde.



Otro ejemplo consiste en anunciar una carta de una baraja de 32 naipes. Todas las posibilidades cuentan con la misma probabilidad, 1/32, por lo que la entropía de Shannon ascendería a log 32 = 5. La cantidad de información que aporta el anuncio se corresponde con el número de preguntas de tipo «sí» o «no» que hemos de formular para identificar la carta (¿es el palo rojo o negro?, ¿es superior al 5?, etcétera).

Shannon demostró que la «entropía» de un idioma puede obtenerse a partir de un cálculo sobre su redundancia. Hay frases que resultan perfectamente comprensibles incluso si suprimimos algunas de las letras que la forman (principio en el que se basan las técnicas de taquigrafía). Como ejemplo, y sin ánimo de halagar a los lectores, Shannon escribió: «ls lctrs ntlgnts cmprndn fclmnt n txt sn vcls».

Shannon siempre insistió en que la dimensión semántica estaba ausente en sus trabajos. La definición estadística de entropía o el uso de la redundancia pueden aplicarse por igual para transmitir una declaración de guerra, los valores de la bolsa o un mensaje desprovisto de significado.

La fórmula para la entropía de Shannon resulta idéntica a la que define la entropía en mecánica estadística, descubierta por los físicos Ludwig Boltzmann y Josiah Gibbs en el siglo XIX. Basta para ello usar logaritmos neperianos y fijar la constante K igual a la constante de Boltzmann ($k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ julios por kelvin). En tal caso, p_i representa la probabilidad de cada uno de los microestados compatibles con las variables macroscópicas que definen un sistema. Con todo, la equivalencia entre la entropía de Shannon y la de Boltzmann-Gibbs ha sido puesta en duda por varios físicos. Entre otros, Hubert Yockey ha señalado que los espacios de probabilidad correspondiente a ambas expresiones no serían equivalentes.

POUR LA SCIENCE

compañía AMAbiotics, piensan que los organismos deben verse como sistemas que recopilan y utilizan información. En este caso, la información se define como una cantidad que se transfiere (aunque no necesariamente se conserva) durante un proceso de medida y que genera correlaciones entre el sistema medido y el que efectúa la medida.

Danchin opina que el demonio de Maxwell debe ser rescatado. En cada célula, moléculas o complejos moleculares recopilarían información para contrarrestar los efectos del envejecimiento y permitir que la célula se reproduzca. Una célula contaría con «demonios moleculares» capaces de distinguir entre las proteínas normales y las disfuncionales, gracias a lo cual podría eliminar estas últimas.

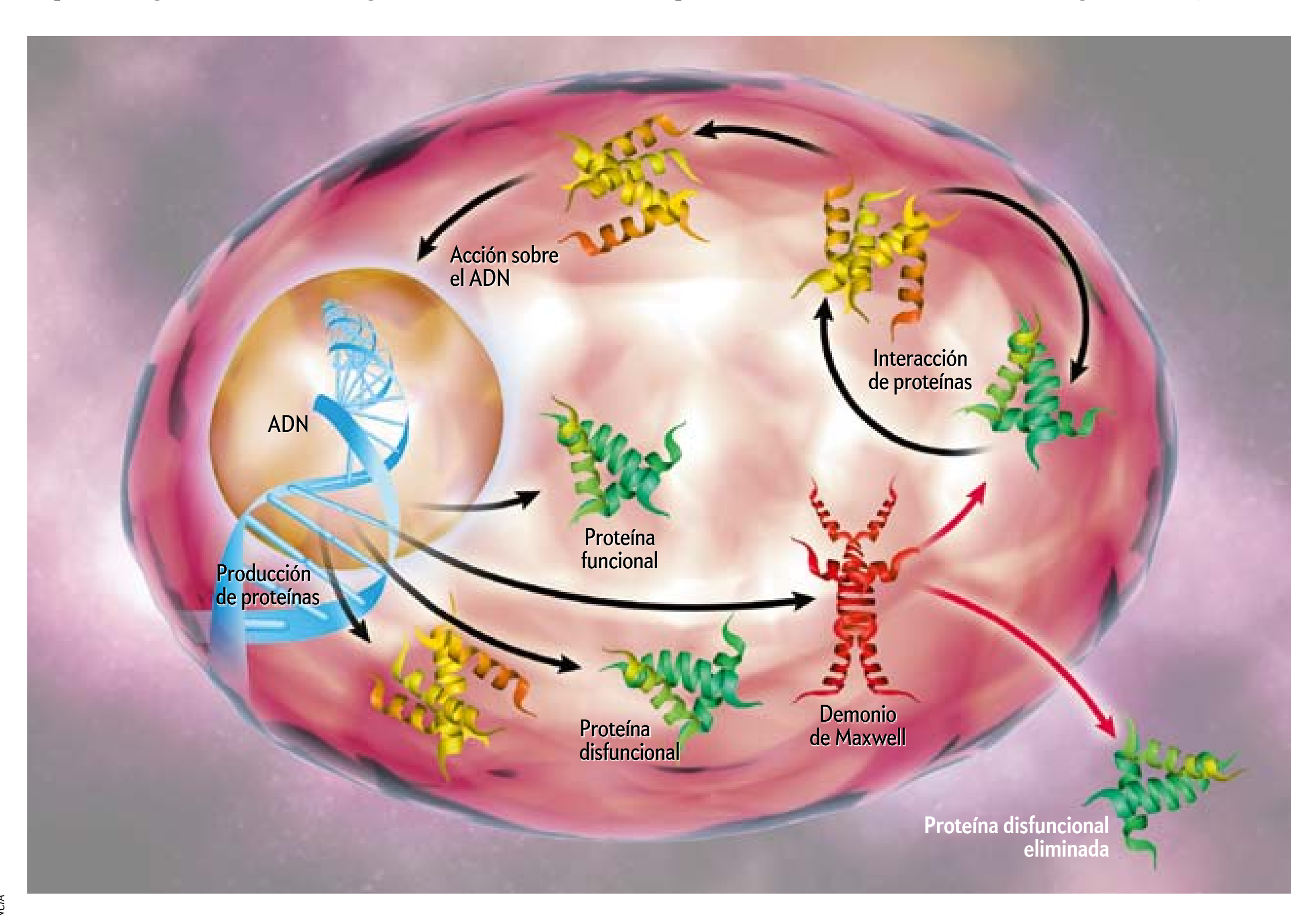
BORRAR INFORMACIÓN CUESTA ENERGÍA

Tales consideraciones nos remontan a las investigaciones que Landauer llevó a cabo en los años sesenta sobre el coste que, en términos de entropía, implicaba el borrado de información. Para reunir información, un demonio de Maxwell biológico ha de modificar su estado y, para volver a funcionar, debe ser «reinicializado». Ello implica un coste en entropía que lleva asociado un gasto energético. Landauer demostró que las operaciones lógicas reversibles, como el operador NOT (que invierte el estado de un bit de 1 a 0, y viceversa), pueden desarrollarse sin coste energético. Sin embargo, las operaciones irreversibles implican un gasto mínimo de energía. Por cada bit de información borrado, es necesario invertir como poco $k_B T \ln 2$ julios de energía, donde T denota la temperatura absoluta.

Según Danchin, ese gasto energético podría ayudar a identificar los demonios de Maxwell celulares. Si existen, tales entidades serían codificadas por el genoma; en concreto, por el *paleoma*, el conjunto de genes que codifican las funciones esenciales para la vida. Los biólogos han comprobado que algunas de esas funciones a las que se considera implicadas en el mantenimiento de la célula conllevan un consumo de energía anómalo. Así, un gasto de energía inesperado podría estar indicando la presencia de un demonio de Maxwell celular.

Uno de tales fenómenos singulares podría tener lugar en uno de los mecanismos de verificación de la traducción del ARN identificado en los años setenta. Existen también otros indicios de la presencia de demonios de Maxwell celulares. Cierta familia de proteínas, las septinas, parecen participar en el confinamiento de proteínas desgastadas en las células de levadura, a fin de evitar que pasen a las células hijas. Las septinas, por tanto, tal vez operen como un demonio de Maxwell celular.

Para Danchin y otros biólogos, identificar los demonios de Maxwell celulares y determinar su funcionamiento constituye un problema de máximo interés. Desde un punto de vista más general, tales cuestiones podrían ayudar al desarrollo de la teoría de la información, aún incompleta en múltiples aspectos. Por ejemplo, se desconoce si la información obedece algún principio de conservación similar al de la energía. Además, la teoría



Información y biología: En el funcionamiento de un ser vivo parecen intervenir procesos que operan de forma similar a un demonio de Maxwell. En este ejemplo, una célula produce varias proteínas, pero algunas de ellas resultan defectuosas y deben eliminarse. Un «demonio de Maxwell» molecular (producto, al igual que las proteíneas, del ADN celular) realizaría ese trabajo. Los investigadores aún deben determinar qué moléculas desempeñan tales funciones.

INTERPRETACIONES TENDENCIOSAS

Información: Usos y abusos

Desde el nacimiento de la teoría de la información, y a pesar de su carácter incompleto y heterogéneo (o quizá gracias a él), algunos han encontrado motivaciones, sobre todo ideológicas, para apuntarse el tanto de una posible unificación. Además, debido a que esta parcela del saber no se halla asociada a instituciones internacionales firmemente establecidas, varias sectas y organizaciones pseudocientíficas han intentado utilizar la teoría de la información para hacer proselitismo.

En la conferencia de la Fundación Macy, en 1949, el fundador de la Iglesia de la Cienciología, Ron Hubbard, se acercó a Shannon y mantuvo con él una conversación en la que intentó comparar la *dianética* (el título de su libro-testamento) y la cibernética. Y en 1975, cuando un grupo de prestigiosos físicos, químicos y biólogos se reunieron para debatir acerca de «La posición central de la ciencia y los valores absolutos», el encuentro no solo versó sobre la noción científica de la información. El rico mecenas que había invitado a los once premios nóbel no era otro que Sun Myung Moon, el fundador de la Iglesia de la Unificación, llamada por algunos —no sin razón— secta Moon. Científicos de la talla de Eugene Wigner, Ilya Prigogine o John Carew Eccles sirvieron de aval científico a la secta, a pesar de que el mismo Eccles, en su discurso de apertura, afirmase citando a Moon que el sentido de esta unificación había que buscarlo en el «espíritu cósmico».

En la primavera de 1997, en medio del revuelo provocado por el anuncio del nacimiento de un clon de oveja adulta, la secta de los raelianos llegó a afirmar que el siguiente paso sería la transferencia de la personalidad de un ser a un clon suyo más joven, «como ya hicieran los Elohím con sus 25.000 años de avance científico» (sic).

Otros científicos, como el biólogo Gunther Stent, se han inclinado hacia un marcado fetichismo del concepto de información genética. Para Stent, «transmitir mediante señales de radio la secuencia de nucleótidos de un gato a una civilización extraterrestre es equivalente a mandarles un gato».

En otros casos, la teoría de la información, y especialmente la parte relacionada con la cibernética, ha ejercido como sucedáneo de la religión. En la República Democrática Alemana la cibernética fue prohibida al ser considerada como una teoría *made in USA* (razón suficiente para desacreditarla en época de la Guerra Fría) que se hallaba en el origen de la automatización y la sustitución de los obreros por robots. A principios de los años cincuenta, sin embargo, los militares soviéticos pudieron hacer comprender a los funcionarios que era necesaria para la defensa del país. Entonces la cibernética pasó a considerarse una encarnación del materialismo dialéctico e incluso su justificación científica. En 1992, el dramaturgo de Alemania oriental Heiner Müller señaló: «Durante un tiempo, la cibernética fue un sustituto de la religión para los funcionarios».

de Shannon no trata sobre la información per se, sino sobre su transmisión, sin hacer referencia a su significado [*véase* «Información y significado», por P. J. Denning y T. Bell, *en este mismo número*].

Existe un aspecto fascinante en la idea de forjar un cuerpo de saber unificado en torno al concepto de información. Si bien esta expectativa ha dado lugar a interpretaciones poco rigurosas, no es menos cierto que la noción de información ha trabado vínculos entre dominios muy dispares. Cabe citar el ejemplo del estructuralismo, nacido en gran parte del encuentro en Nueva York en los años cuarenta entre el lingüista Roman Jackobson y el antropólogo Claude Levi-Strauss. Su lenguaje común, lo que fomentó aquel intercambio, fue la búsqueda de una definición del concepto de información. Durante aquella época y hasta finales de los años sesenta se intentó hallar la unidad del saber en torno a una ciencia del lenguaje.

UN LARGO CAMINO POR DELANTE

Con el desarrollo de lo que, tal vez de forma abusiva, ha dado en llamarse cibernética de segundo orden (en la que se considera la *autopoiesis*, o la posibilidad de que un sistema autorregulado cree orden), la teoría de la información ha hallado aplicaciones interesantes en economía. Algunos economistas, como Friedrich Hayek, han creído poder justificar desde un punto científico las posturas liberales; es decir, la defensa de un mercado autorregulado sin intervención del Estado. Aunque después se ha aplicado a ámbitos a priori no mercantiles, esta postura dio lugar al neoliberalismo tal y como fue definido y promovido por la escuela de Chicago.

En todo caso, ha sido en los dominios estrictamente científicos y técnicos donde el concepto de información se ha mostrado más fecundo y pertinente. Además del demonio de Maxwell, en física teórica cabe citar la termodinámica de los agujeros negros, donde el destino de la información y entropía de un objeto que traspasa el horizonte de sucesos constituye una cuestión fundamental aún por resolver. En lo que a aplicaciones prácticas se refiere, los logros son innumerables, tanto en telecomunicaciones como en informática.

Por último, las investigaciones relacionadas con la información cuántica están comenzando a rendir sus primeros frutos tecnológicos. La empresa ID Quantique, nacida en la Universidad de Ginebra, ya empleó procesos cuánticos para cifrar una parte del sistema de comunicaciones durante la última Copa del Mundo de fútbol. Y el grupo de investigación de Anton Zeilinger, de la Universidad de Viena, logró hace poco transmitir fotones entrelazados a más de 140 kilómetros de distancia. La teoría de la información acaba de cumplir 65 años; pero, como a la gran mayoría de los sexagenarios, aún le quedan unos maravillosos días por delante.

PARA SABER MÁS

Information theory and molecular biology. H. Yockey. Cambridge University Press, 1992.
La información. Colección TEMAS de *Investigación y Ciencia* n.º 36, 2004.
Le moment cybernétique: La constitution de la notion d'information. M. Triclot. Champ-Vallon, 2008.
Descodificando la realidad: El universo como información cuántica. Vlatko Vedral. Ediciones de Intervención Cultural, 2011.
Le zéro et le un. J. Segal. Matériologiques, octubre de 2011. Edición electrónica: **www.materiologiques.com**
Life's demons: Information and order in biology. P. M. Binder y A. Danchin en *EMBO Reports*, vol. 12, n.º 6, págs. 495-499, 2011. Disponible en **www.nature.com/embor/journal/v12/n6/full/embor201183a.html**

por Javier Martínez Abaigar y Encarnación Núñez Olivera

Briófitos en arroyos de montaña

Se caracterizan por resistir ante distintas adversidades ambientales, entre ellas, la elevada radiación ultravioleta

Los briófitos (entre los que se incluyen antocerotas, hepáticas y musgos) colonizan con preferencia ambientes hostiles, donde parecen vivir al límite de lo soportable. Sin embargo, gracias a su tolerancia al estrés, su sencillez estructural y sus escasos costes de mantenimiento, compiten con éxito frente a otros organismos fotosintéticos, tanto algas como plantas más complejas.

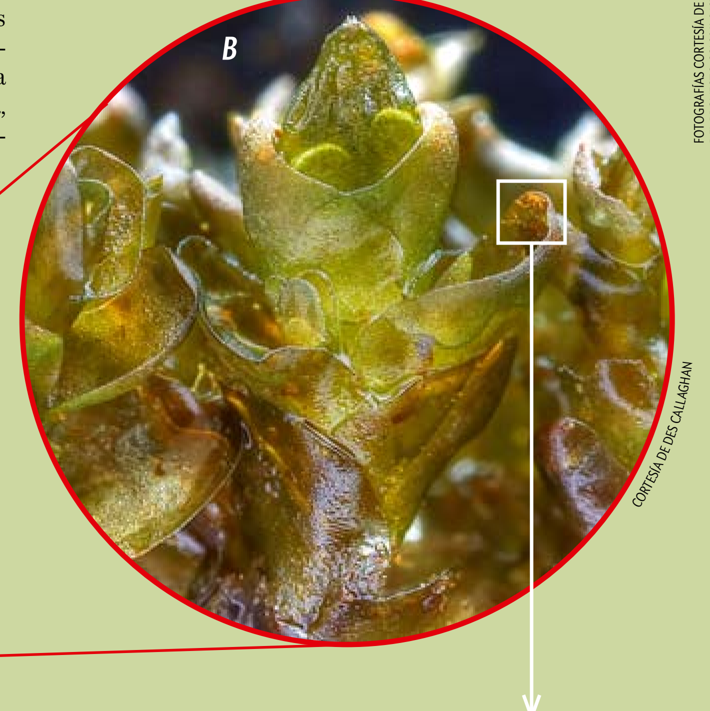
En los arroyos de montaña, uno de los duros ambientes donde predominan los briófitos, los vegetales deben hacer frente a numerosos factores adversos a lo largo del año: el gélido frío de invierno, el abrasivo embate del caudal de agua en primavera, el sol despiadado y la desecación en verano, y lo que designe el azar en otoño.

En nuestras investigaciones pretendemos conocer en particular los mecanismos de protección que despliegan los briófitos ante la elevada radiación ultravioleta (UV) de las zonas montañosas, otro de los factores de estrés a los que deben adaptarse. Esta adaptación está revestida de una gran importancia evolutiva, puesto que los briófitos fueron las primeras plantas que colonizaron el medio terrestre a partir de antepasados algales que vivían en el agua, por lo que tuvieron que soportar nuevos y altos niveles de radiación UV. Uno de los mecanismos de protección consiste en acumular compuestos que absorben esa radiación, como el ácido para-cumaroilmálico en la hepática *Jungermannia cordifolia*. Este compuesto constituye un biomarcador potencial de interés, ya que podría informar sobre el aumento de radiación UV-B que se produce en la biosfera como consecuencia de la degradación antropogénica del ozono estratosférico.

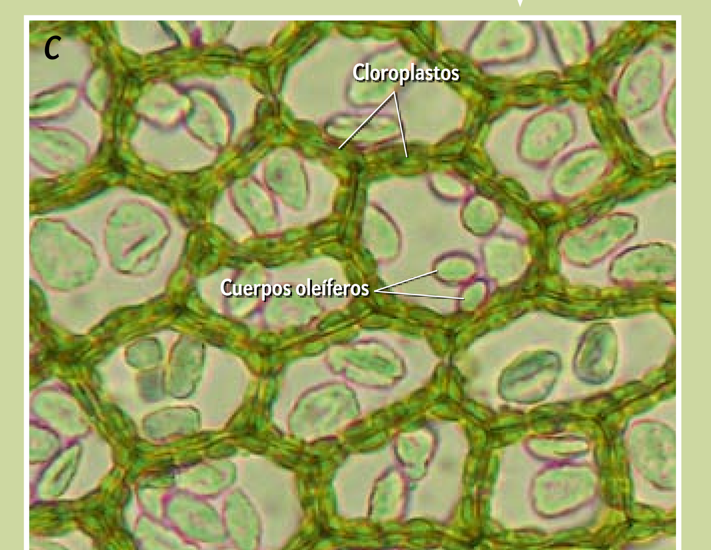
Javier Martínez Abaigar y Encarnación Núñez Olivera
Universidad de La Rioja

FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DE LOS AUTORES; LOS DATOS PRESENTADOS FORMAN PARTE DEL PROYECTO CGL2011-26977 (MINECO-FEDER)





CORTESÍA DE DES CALLAGHAN



Masas de la hepática acuática *Jungermannia cordifolia* **en un arroyo de montaña (*A*), junto con un detalle de la planta (*B*) y las típicas células poligonales de sus filidios u hojas, con cloroplastos periféricos y cuerpos oleíferos en el centro (*C*).**



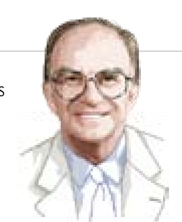
El río Lumbreras, en la sierra Cebollera (La Rioja), a 1900 metros de altitud, constituye uno de los ambientes donde se estudia el efecto de la radiación ultravioleta en los briófitos.

Musgo del género *Bryum*, uno de los briófitos presentes en el río Lumbreras. El gametófito, la parte verde fotosintética, ofrece soporte al crecimiento del esporófito, las cápsulas donde se producirán las esporas.

Efectos de la radiación UV-B en *Jungermannia cordifolia*. En comparación con los filidios no expuestos (*A*), los filidios expuestos a UV-B muestran células marginales pardas y paredes celulares oscuras (*B*).

por John Meurig Thomas

John Meurig Thomas fue, como Lawrence Bragg antes que él, director y titular de la cátedra Fuller de la Real Institución de Londres. Actualmente es miembro del departamento de ciencia de materiales y metalurgia de la Universidad de Cambridge.



El nacimiento de la cristalografía de rayos X

El físico Lawrence Bragg publicó hace cien años una ecuación que iba a revolucionar la ciencia, desde la mineralogía a la biología

En el verano de 1912, un estudiante de doctorado de 22 años pasaba las vacaciones con su familia en la costa británica de Yorkshire cuando su padre, el físico William H. Bragg, recibió una carta que describía una importante conferencia de Max von Laue, un prestigioso físico teórico alemán.

En su conferencia, Von Laue daba cuenta de las primeras observaciones de la difracción de rayos X en un cristal (el mineral sulfuro de zinc, ZnS), realizadas por sus colegas Walter Friedrich y Paul Knipping. Los experimentos demostraban que los rayos X eran ondas, cerrando así una controversia que se remontaba a su descubrimiento, 17 años atrás. Aquel verano, Bragg y su hijo Lawrence investigaron febrilmente la difracción de rayos X en la Universidad de Leeds, donde W. Bragg era profesor de física.

De vuelta a la Universidad de Cambridge tras las vacaciones, Lawrence tuvo una idea revolucionaria. Los resultados de Von Laue, ¿no respondían simplemente a la reflexión de los rayos X en los planos de átomos del cristal? Lawrence se dio cuenta de que los experimentos de difracción aportaban pruebas sobre la estructura cristalina.

Von Laue y sus colaboradores habían explicado sus patrones de difracción a partir de la hipótesis de que su fuente de rayos X era policromática, es decir, comprendía seis o siete longitudes de onda. Habían supuesto también que la estructura del ZnS era la de una red cúbica, en la que los átomos de zinc y los de azufre se alternaban en los vértices.

Al examinar las fotografías de rayos X, L. Bragg advirtió que los puntos de difracción tenían una intensidad variable, y que en algunos casos mostraban una forma elíptica. En un artículo que su director de tesis, J. J. Thomson, presentó ante la Sociedad Filosófica de Cambridge el 11 de noviembre de 1912, Bragg propuso una explicación de ambas características.



Lawrence Bragg, que tenía 25 años cuando recibió el premio Nobel, es el galardonado más joven de la historia.

En primer lugar, sugirió que los resultados de Von Laue se debían a la reflexión, en los planos de átomos del cristal, de rayos X con un espectro continuo de longitudes de onda. De este modo obtuvo la ley de Bragg de la difracción de rayos X, $n\lambda = 2d \operatorname{sen} \theta$, donde θ es el ángulo de incidencia de rayos X de longitud de onda λ, d corresponde a la separación entre los planos reflectores y n es un número entero. En segundo lugar, Bragg propuso que el patrón de difracción de los rayos X en ZnS evidenciaba una estructura cúbica centrada en las caras, en la que los átomos ocupaban no solo los vértices, sino también el centro de las caras de cada celda cúbica.

Desde entonces, son cerca de una docena los premios Nobel concedidos a trabajos relacionados con la cristalografía de rayos X, la técnica desarrollada por Bragg y que él mismo utilizó en sus trabajos pioneros sobre la estructura de minerales, metales, óxidos y aleaciones. Sus colegas fueron los primeros en utilizar la cristalografía de rayos X para determinar la estructura de proteínas y enzimas, y en formular el modelo de doble hélice del ADN. En mi opinión, esta técnica sigue constituyendo la herramienta analítica más potente para los científicos que trabajan en física, biología, medicina, ciencias de materiales, de la Tierra e ingeniería.

Visionarios

Entre la audiencia en Cambridge en noviembre de 1912 se hallaba C. T. R. Wilson, físico que en 1927 ganaría el Nobel por la detección de la radiación cósmica con un instrumento de su invención, la cámara de niebla [*véase* «Un siglo de rayos cósmicos», por Michael Friedlander; Investigación y Ciencia, octubre de 2012]. Según Wilson, los rayos X deberían reflejarse también en las caras externas del cristal, siempre que la superficie fuera lo bastante lisa. L. Bragg comprobó esta hipótesis usando mica, cuya cara de exfoliación se suponía muy lisa a escala atómica. Sus fotografías de «La reflexión especular de rayos X» aparecieron en *Nature* en diciembre de 1912.

W. Bragg demostró a continuación que su espectrómetro de rayos X era capaz de detectar rayos X monocromáticos difractados mediante un detector de la ionización gaseosa, en lugar de una placa fotográfica. Usado en combinación con la ley de Bragg, este tipo de espectrómetro abría enormes posibilidades, como demostraron sendos artículos publicados en 1913 en *Proceedings of the Royal Society of London A*. En el primero de ellos, L. Bragg describió la estructura de los cristales de cloruro de sodio, cloruro de potasio, bromuro de potasio y yoduro de potasio; en el segundo, padre e hijo determinaron la estructura del diamante.

La técnica de los Bragg permitía determinar la arquitectura interna de los

CORTESÍA DE S. L. BRAGG (*Lawrence Bragg*); JOHN HOLMAN (*John Meurig Thomas*)

sólidos cristalinos y explicar así sus propiedades. La estructura del diamante, con su red tridimensional de átomos de carbono fuertemente ligados entre sí, explicaba su dureza, del mismo modo que la estructura del grafito, descubierta en los años treinta mediante la cristalografía de rayos X, daba cuenta de su blandura. El diamante y el grafito tienen la misma composición, pero su estructura los hace muy diferentes tanto mecánica como química y electrónicamente.

Tras la Primera Guerra Mundial, cuando su contenido alcanzó los libros de texto, esos artículos fueron recibidos con gran sorpresa y emoción. Sorpresa, porque Bragg había demostrado más allá de toda duda que la sal de roca no contenía ninguna molécula de cloruro de sodio, sino tan solo átomos de sodio y cloro que se alternaban en la red. Ello contradecía las ideas químicas más extendidas. Entre los escépticos se hallaba Henry Armstrong, antiguo presidente de la Sociedad Química de Londres, que en 1927 atacó duramente en la revista *Nature* las conclusiones de Bragg, describiendo el «tablero de ajedrez» de los átomos del cloruro de sodio como «repugnante al sentido común» y «absurdo a la enésima potencia». Para otros, en cambio, los resultados sobre la estructura del diamante eran emocionantes porque confirmaban la coordinación tetraédrica anticipada por J. H. van't Hoff hacía cuarenta años.

Durante décadas, la ecuación y el espectrómetro de los Bragg fueron la piedra angular de la cristalografía de rayos X, desplazando al método original de Von Laue, basado en la difracción de rayos X policromáticos. Sin embargo, algunos experimentadores combinaron con éxito ambos métodos. Un ejemplo destacado es el de Linus Pauling, que en 1925 determinó la estructura de la hematita y el corindón.

La cosecha del Nobel

L. Bragg compartió con su padre el premio Nobel de 1915 «por sus servicios en el análisis de la estructura de los cristales mediante los rayos X». Tenía solo 25 años, y sigue siendo el galardonado más joven de la historia. Bragg trabajaría a un ritmo prodigioso durante los siguientes cincuenta años. Von Laue recibió el Nobel en 1914 por el descubrimiento de la difracción de rayos X en cristales; a diferencia de Bragg, sin embargo, no continuó estas investigaciones, sino que pasó a ocuparse de la relatividad y otras áreas de la física teórica.

En 1919, L. Bragg sucedió a Ernest Rutherford como catedrático de física de la Universidad de Manchester. Mediante las técnicas que había desarrollado en 1912 y 1913, Bragg dio cuenta de las propiedades físicas y químicas de los silicatos, los minerales más abundantes, que no habían podido ser descritas en términos atómicos. Consiguió explicar, por ejemplo, por qué la mica y el talco son tan blandos pero el berilo es duro.

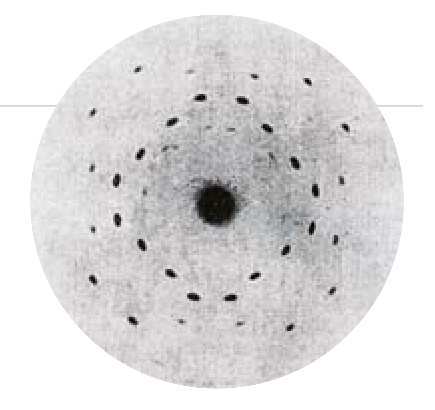
Bragg demostró también que muchos minerales, en especial los silicatos, contienen esencialmente átomos de oxígeno de carga negativa, que ocupan la mayor parte del espacio. Átomos más pequeños de carga positiva (cationes) se alojan en los espacios intersticiales. Bragg descubrió una coordinación tetraédrica constante de cuatro átomos de oxígeno, independiente de la proporción entre silicio y oxígeno. En Manchester resolvió también la estructura del latón γ, de las aleaciones magnéticas y otras estructuras fundamentales para el desarrollo de la teoría moderna de los metales.

En 1938 Bragg volvió a suceder a Rutherford, esta vez como catedrático de la Universidad de Cambridge. Tras la Segunda Guerra Mundial animó a sus discípulos Max Perutz y John Kendrew en la dificilísima determinación de las proteínas hemoglobina y mioglobina mediante la cristalografía de rayos X. Posteriormente apoyaría el trabajo cristalográfico de Francis Crick y James Watson sobre la estructura del ADN.

Ver para creer

En 1953, Bragg fue nombrado director de la Real Institución británica en Londres y titular de la cátedra Fuller de la misma institución. David Phillips y Tony North, junto con otros colaboradores, investigaron estructuras biológicas, mientras Perutz y Kendrew eran nombrados lectores honorarios. Un difractómetro automático lineal de rayos X, construido ex profeso en la Real Institución, permitió a Kendrew, Phillips y otros describir la primera estructura de una proteína, la mioglobina. Phillips y Louise Johnson lo utilizaron para establecer la estructura y el modo de acción de la lisozima, la primera enzima descrita mediante rayos X. En 1962, Bragg supo con satisfacción de la concesión del Nobel a sus acólitos Perutz, Kendrew, Crick y Watson.

El método de Bragg para la determinación de estructuras constituye el fundamento de la cristalografía de rayos X moderna. Actualmente, el método se ha automatizado casi del todo, gracias al uso



La fotografía de Max von Laue de la difracción de rayos X en sulfuro de zinc mostraba puntos con distintas formas e intensidades.

FUENTE: W. FRIEDRICH, P. KNIPPING Y M. VON LAUE EN *SITZUNGSBERICHTE DER MATH. PHYS. KLASSE (KGL.) BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN* 303-322, 1912

de refinados detectores de rayos X y algoritmos para el análisis de centenares de miles de intensidades de difracción.

La disponibilidad creciente de fuentes de radiación de sincrotrón y detectores de lectura rápida ha propiciado el estudio de los cambios estructurales que se producen a una escala temporal inferior a los picosegundos en macromoléculas como la proteína amarilla fotoactiva. Un trabajo publicado el año pasado en *Reports on Progress in Physics* ofrece un buen ejemplo de ello. En este, se irradiaron con pulsos del orden de 10^{-15} segundos gotas que contenían macromoléculas clave, como el fotosistema I, esencial para la fotosíntesis (los pulsos de radiación X son tan breves como para no dañar las moléculas, pero suficientemente intensos como para generar datos de calidad sobre la difracción).

El trabajo iniciado en Yorkshire en el verano de 1912 tiene hoy una resonancia mundial. En noviembre de 2012 Venki Ramakrishnan, que compartió el premio Nobel de química de 2009 por el descubrimiento de la estructura del ribosoma, catalizador de la síntesis de proteínas, pronunció una conferencia en la Sociedad Filosófica de Cambridge. ¿Su título? «Ver para creer: un siglo después, la ley de Bragg nos permite contemplar el interior de las moléculas que leen la información de nuestros genes».

Artículo original publicado en *Nature* 491, págs. 186-187, 2012. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

PARA SABER MÁS

Fifty years of X-ray diffraction. W. L. Bragg. Coordinado por P. P. Ewald, págs. 531-539. International Union of Crystallography, 1962.

Selections and reflections: The legacy of Sir Lawrence Bragg. Coordinado por J. M. Thomas y D. C. Phillips. Science Reviews, 1990.

X-ray lasers for structural and dynamic biology. J. C. H. Spence, U. Weierstall y H. N. Chapman en *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, pág. 102.601, 2012.

por Michael Fertik

Michael Fertik es fundador y director general de Reputation.com, que es miembro del consejo de actuación global del Foro Económico Mundial sobre el futuro de Internet.



Historia de dos Internets

El noventa y nueve por ciento de nosotros vive en la parte desfavorable de un espejo unidireccional

Imagine usted una Internet desde la que manos invisibles se ocupen de cuanto ocurre en su vida. Una Red en la que son terceros quienes predeterminan las noticias, los productos y los precios que va usted a ver, e incluso a las personas a las que va a conocer. Un mundo en el que usted se cree que goza de albedrío, pero donde, en realidad, sus opciones están limitadas y filtradas hasta que lo único que le hayan dejado sea la mera ilusión de que es usted quien tiene el control.

Este escenario no se halla lejos de lo que ya está ocurriendo. Gracias a técnicas que capacitan a Google, Facebook y otros a recopilar información sobre nosotros y a servirse de ella para adaptar nuestra experiencia como usuarios a nuestros personales gustos, hábitos e ingresos, Internet se ha transformado en un mundo diferente para los ricos y para los pobres. La mayoría de nosotros nos hemos convertido en pánfilos actores de un drama en desarrollo, cuyo argumento son las dos Internets. Hay mío y tuyo, lo de ellos y lo nuestro.

He aquí cómo funciona. En la actualidad, por volumen de ingresos, es la publicidad la que mueve la inmensa mayoría de la industria de Internet. Silicon Valley es excelente en la fundación y financiación de compañías que ofrecen aplicaciones gratuitas, aplicaciones que después recopilan y venden los datos de quien las utiliza. A lo largo de casi toda la breve historia de Internet, la finalidad primaria de esta recopilación de datos ha sido la mercadotecnia de productos clásica: los anunciantes pueden, por ejemplo, querer ofrecerme calzado deportivo, y a mi esposa, prendas de vestir. Pero la recolección de datos está, cada vez más, yendo mucho más allá de la publicidad estricta, dando ocasión a que compañías de seguros, de servicios médicos y de otras clases se beneficien —sin nuestro conocimiento— del registro de nuestros «datos macroscópicos» y también de información de carácter personal muy detallada. Basándose en este análisis, las compañías mencionadas toman decisiones que nos conciernen, entre ellas, incluso la de si vale la pena tratar de vendernos algo.



En consecuencia, el noventa y nueve por ciento de nosotros vive en el lado reflectante de un espejo semitransparente, desde el cual es imposible ver a ese uno por ciento que manipula nuestras experiencias. Hay quienes alaban esta tendencia, que califican de «personalización», lo que suena inocuo y grato, y evoca la idea de que los anuncios que pudiéramos ver se nos mostrarán en nuestros colores favoritos. A lo que nos referimos, sin embargo, es mucho más profundo, y de no poca trascendencia.

Por ejemplo, en EE.UU., normas federales de aplicación en todos los estados de la Unión declaran ilegal que los costes de acceso a los créditos se basen en ciertos atributos personales. Pero, como Natasha Singer ha señalado en el *New York Times*, los avances técnicos en minería de datos, tanto en línea como en desconexión, permiten esquivar el espíritu de la ley: las compañías pueden no hacer oferta alguna a las poblaciones crediticiamente menos atractivas. Si se vive en los «barrios bajos» del mundo digital, no nos llegará ni una propuesta de las principales instituciones de préstamo y no se tendrá noticia de la disponibilidad de créditos que puedan ayudarnos en nuestras prioridades personales o profesionales del momento.

Durante el decenio pasado, los puntos de venta del comercio electrónico han venido ajustando los precios que le exigen al consumidor, basándose en sus hábitos en la Red y sus características personales. ¿Dónde ha vivido usted? ¿Cuál ha sido su historial de compras? ¿Cómo ha llegado usted al punto de venta electrónico? ¿A qué hora del día está visitándolo? Ha surgido toda una literatura sobre la eticidad, la legalidad y el futuro de la optimización de precios. Y la especialidad está avanzando rápidamente. En septiembre pasado, le fue concedida a Google una patente sobre cierta técnica que permite a las compañías ajustar dinámicamente los precios de contenidos electrónicos. Esta técnica puede, por ejemplo, elevar el precio base de un libro electrónico si determina que tiene usted mayor probabilidad de comprar ese ítem en particular que el usuario medio; o, a la inversa, rebajarlo, como incentivo, si se juzga menos probable que usted lo adquiera. Y el consumidor no podrá saber que está pagando más que otros por exactamente el mismo producto.

También esos muros ciegos se alzan en nuestras vidas políticas digitales. Como ha observado Eli Pariser, Internet nos presenta «lo que cree que queremos ver», sirviéndonos contenidos acordes con los perfiles ocultos que han sido creados acerca de nosotros, obtenidos a base de nuestras interacciones diarias en línea. Esta «programación» entre bastidores refuerza nuestras opiniones políticas mediante «cámaras ecoicas» que refuerzan lo que ya creemos verdadero, en lugar de hacernos reflexionar. Como ha escrito Cass Sunstein, de la Universidad Harvard, trátese de la izquierda o de la derecha, allí donde los problemas solamente se analicen abiertamente con personas de una misma orientación política, los participantes se vuelven cada vez más firmes y extremistas en sus opiniones.

La segregación y la discriminación están en alza. La cara amable de la personalización tiene un lado oscuro.

IZHAR COHEN

por Hervé This



Hervé This pertenece al grupo de gastronomía molecular del Instituto AgroParisTech y es director científico de la Fundación Ciencia y Cultura Alimentaria de la Academia de las Ciencias francesa.

Desnatados, pero menos sabrosos

A los yogures que no contienen grasas se les da untuosidad por medio de espesantes. Por desgracia, dicha adición puede frenar la liberación de moléculas olorosas

Los yogures desnatados, buenos para la línea, son mediocres en boca. Los fabricantes les añaden polisacáridos para devolverles su agradable consistencia y con ello mejorar el gusto global del alimento. En el Instituto Nacional de Investigación Agronómica francés de Dijon, S. Lubbers, N. Decourcelle, N. Vallet y E. Guichard examinaron cómo la adición de dichos espesantes modifica el olor de los yogures.

Espesar el yogur es como ligar las salsas. Pregunta: ¿por qué espesar? Respuesta: para retrasar el momento en que se absorbe el alimento y aumentar así la duración del placer de la degustación. No obstante, este espesamiento tiene su contrapartida, ya que frena la liberación de las diversas sustancias que dan sabor al alimento: moléculas sápidas, que activan los receptores de las papilas; moléculas olorosas, que estimulan los receptores olfativos al subir por las fosas retronasales, en la parte posterior de la boca; moléculas que estimulan el nervio trigémino para destacar el sabor fresco o el picante...

Dichas moléculas solo actúan si son liberadas, y cualquier interacción que tengan con otros compuestos del alimento limita su liberación. Los largos polímeros de amilosa que conforman el almidón, por ejemplo, se enrollan en forma de hélice y forman cavidades donde se alojan las moléculas olorosas.

La amilosa no es un caso aislado. Los numerosos grupos hidroxilo (-OH) que posee esta cadena de unidades de glucosa están presentes en todos los polisacáridos o azúcares complejos. Son precisamente los polisacáridos los que se utilizan como espesantes porque los grupos hidroxilo se unen a las moléculas de agua. Al tratarse de moléculas de gran tamaño acompañadas de un cortejo de moléculas de agua, los polisacáridos aumentan la viscosidad y, por tanto, el espesamiento de la mezcla... y los efectos negativos sobre el olor de los alimentos.

Así pues, las moléculas olorosas se separan con mayor dificultad de una solución viscosa y, además, interactúan con las partes hidrófobas de los polisacáridos. En ciertos casos se produce una retención excesiva y el alimento pierde sabor porque pierde olor; en otros, el alimento gana longitud en boca porque sus moléculas olorosas, débilmente unidas, se van liberando más lentamente. Eso es lo que los cocineros ya saben, pero que hay que estudiar con precisión.



Los fisicoquímicos de Dijon examinaron el olor de los yogures desnatados. Un yogur es leche solidificada por la acción de bacterias lácticas. Estas, al consumir la lactosa (el azúcar que se encuentra en la leche de forma natural) producen ácido láctico, que hace precipitar las proteínas de la leche; estas forman una red que aprisiona el agua de la leche y también la grasa que pueda haber.

Estudiaron yogures de fresa obtenidos a partir de la mezcla de yogures naturales con un preparado de fresas al que se le habían añadido espesantes: almidón de maíz modificado, pectina de limón, goma guar y fructo-oligosacáridos; el preparado contenía también aspartame y acesulfame (edulcorantes), fructosa, citrato de calcio, citrato de sodio, pulpa de fresas y agua. En conjunto, los yogures de fresa son a la vez viscosos y elásticos. Con el almacenaje, su textura evoluciona ligeramente porque los microorganismos continúan aumentando ligeramente la acidez al producir principalmente ácido láctico, que refuerza el gel láctico.

A continuación, S. Lubbers y sus colaboradores estudiaron la liberación de las moléculas olorosas que se habían añadido a los yogures: cuatro ésteres (aroma de fresa, fruta, bombón de fresa y floral) y un alcohol (aroma de hojas verdes). El olor de los yogures se controló durante 28 días.

Para medir el olor liberado por los diversos preparados, utilizaron un sistema muy en boga entre los especialistas en olores, que consiste en sumergir una fibra de un polímero en el vapor desprendido por un preparado oloroso y desorber después las moléculas adsorbidas en un aparato que las identifique.

Los químicos incorporaron su mezcla de fragancias a distintos sustratos (agua, agua con un preparado de frutas y yogur desnatado) y midieron la desorción de las moléculas olorosas. Hallaron que el olor desprendido disminuía progresivamente desde el agua pura (que retiene pocas o ninguna molécula olorosa) al agua con preparado de frutas y, finalmente, al yogur de frutas. Los espesantes reducen la liberación de ésteres ya que, tal como podía preverse, las moléculas olorosas del aroma se unen a los polímeros que los espesantes contienen. Espesemos, pues, nuestros alimentos con espesantes bien seleccionados, para que liberen adecuadamente los aromas, de forma que su gusto sea el óptimo. Buen provecho.

SALUD

AVANCES EN MED REGENER

EL FUTURO DE LA REPARACIÓN TISULAR

EN SÍNTESIS

El campo emergente de la medicina regenerativa podría revolucionar el tratamiento de las enfermedades cardíacas y los trastornos neurodegenerativos, resolver el problema de la escasez de donantes de órganos y restaurar por completo músculos, tendones y otros tejidos dañados.

Se está descubriendo que la clave consiste en ofrecer al cuerpo una especie de equipo básico, formado por varias proteínas, fibras o células, o en clonar las células madre semiespecializadas presentes en los pacientes adultos, y permitir que el organismo tome el control a partir de entonces.

Estas intervenciones permiten que el organismo regenere el tipo y la cantidad de tejido necesario, algo que no podría hacer por sí solo. Los tratamientos ya han reparado algunos corazones enfermos y han ayudado a los cirujanos a regenerar músculos dañados.

ICINA ATIVA

ÚNICO ENTRE LOS ÓRGANOS MÁS GRANDES DEL CUERPO HUMANO, EL HÍGADO POSEE UNA notable capacidad para recuperarse de una lesión. Si se pierde una parte de él en un accidente o durante una intervención quirúrgica, el órgano puede recuperar por completo su tamaño y función, siempre y cuando al menos una cuarta parte permanezca inalterada y no presente cicatrices. Por desgracia, esta capacidad de autorregeneración no existe en otras partes del cuerpo. Una salamandra puede regenerar su cola, pero una persona no puede recuperar una pierna amputada o renovar las secciones del cerebro perdidas a causa de la enfermedad de Alzheimer. Para lograr tal proeza, los humanos debemos recurrir a otras estrategias. Tal es la promesa de un campo de investigación en auge: la medicina regenerativa [*véase* «Retos de la medicina regenerativa», por M. J. Barrero y J. C. Izpisúa; en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2012].

Las células madre, células progenitoras que pueden dar lugar a una variedad de tejidos, cumplen una importante función en ese empeño. Los científicos están aprendiendo a mezclar una serie de moléculas de glúcidos, proteínas y fibras para crear un entorno en el que las células madre puedan desarrollarse y formar el tejido de reemplazo. Tal y como se describe en las siguientes páginas, se han realizado grandes progresos en la sustitución de tejido cardíaco dañado y en la reconstrucción de músculo, y también se han dado los primeros pasos en la creación de células nerviosas. Algunos de estos avances podrían salir del laboratorio y convertirse en tratamientos en pocos años; otros tal vez tarden décadas en hacerlo o, en última instancia, fracasen. Se presentan algunos de los más prometedores. *—La redacción*

Cambio de corazón

Las células madre pueden transformar el tratamiento médico de la insuficiencia cardíaca

Ferris Jabr

REPARACIÓN CARDÍACA
Cultivar las células madre semiespecializadas de un corazón enfermo, ayudarlas a multiplicarse e inyectarlas en el mismo corazón permite que el órgano destruya el tejido cicatricial y fabrique músculo nuevo.

A PRINCIPIOS DE 2009, Mike Jones compró un periódico en una tienda de oportunidades de Louisville, en Kentucky, y leyó acerca de un médico que quería probar algo sin precedentes: curar un corazón enfermo mediante el cultivo y la multiplicación de las células madre del propio órgano, unas células inmaduras con poderes regenerativos. Jones, que tenía entonces 65 años, sufría insuficiencia cardíaca congestiva: su corazón ya no bombeaba la sangre de manera eficiente. Se puso en contacto con el médico, Roberto Bolli, de la Universidad de Louisville, y en julio de ese mismo año, Jones se convirtió en la primera persona del mundo en recibir una perfusión de sus propias células madre cardíacas.

Antes del tratamiento, Jones apenas podía subir escaleras; hoy, en cambio, se siente lo bastante bien como para cortar la leña y aclarar las ramas caídas de los árboles de su propiedad, de unas cuatro hectáreas. Su *fracción de eyección*, una medida de la cantidad de sangre que bombea el corazón de una cámara a otra, aumentó del 20 al 40 por ciento en los dos años siguientes al tratamiento experimental. Se trata de un valor inferior al normal (que varía del 55 al 70 por ciento), pero sigue siendo una mejora notable.

Desde entonces, cientos de pacientes con cardiopatías se benefician de la inyección de células madre extraídas de su propio corazón o médula ósea, así como de donantes no emparentados con ellos. Se cree que esas células se convierten en tejidos nuevos y estimulan la división de otras. Sin embargo, todavía siguen sin respuesta numerosas preguntas. Se desconoce cuál de los diferentes tipos de células madre funciona mejor y el modo exacto de prepararlas antes del tratamiento. Pero se están realizando avances rápidos. En opinión de Bolli, nos hallamos en los albores de una de las mayores revoluciones de la medicina: «Aunque todavía tenemos que perfeccionarla, la técnica funciona. En el futuro, tomaremos nuestras propias células madre, las haremos crecer y las mantendremos en congeladores hasta que las necesitemos».

ESTIMULAR LA REGENERACIÓN

Durante las últimas cuatro décadas, se ha considerado el corazón humano como una bomba viviente, poderosa y vulnerable a la vez. Debido a que el órgano adulto parecía incapaz de regenerar sus células, se pensaba que cualquier muerte celular lo debilitaría de forma irrevocable. Pero de vez en cuando, algún científico vislumbraba al microscopio células cardíacas adultas dividiéndose. La datación por carbono de tejido conservado ha confirmado desde entonces que el corazón adulto renueva sus células durante toda la vida, aunque este recambio es limitado en comparación con el del intestino o la piel. En la actualidad, se estima que cada año regenera el 1 por ciento o más de sus entre cuatro y cinco mil millones de células musculares. Se ha descubierto que estas se originan por la multiplicación de las células maduras y de células madre presentes en el corazón.

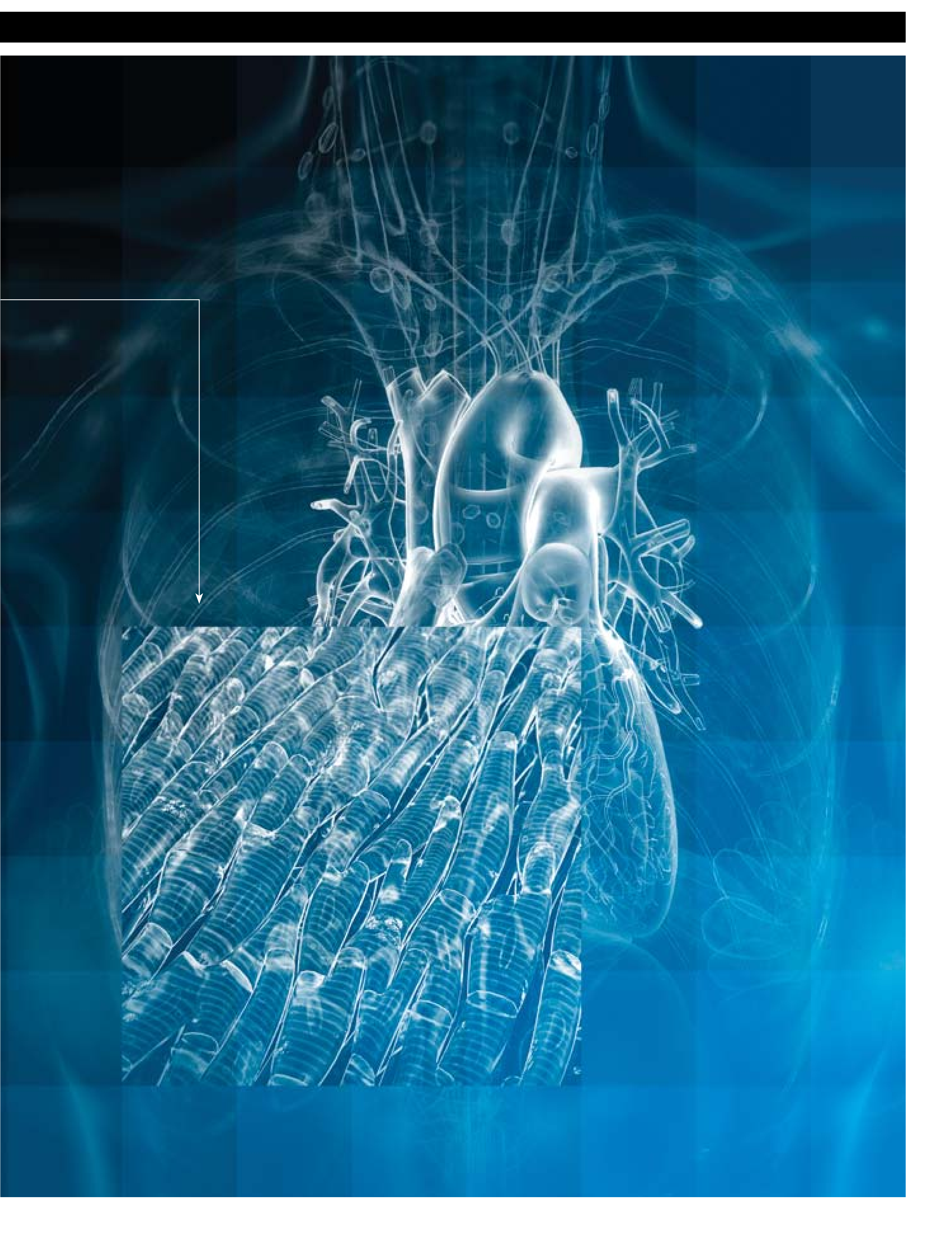
Las células madre permiten que el órgano se repare poco a poco a sí mismo. Después de un infarto de miocardio, maduran en forma de nuevas células cardíacas y estimulan la división de las existentes. Sin embargo, esta autorreparación solo dura una semana o dos, un tiempo insuficiente para reemplazar los más de mil millones de células que se pierden en un infarto. Como resultado, se forma una gran zona de tejido cicatricial inflexible. Al igual que un neumático de coche sobresale cuando se ha dañado, el corazón humano se hincha donde se han producido las cicatrices. Así, lo que era un órgano eficiente se convierte en una bomba débil e ineficaz.

El tratamiento con células madre consiste en administrar al corazón una dosis enorme de sus propias células reparadoras. Los estudios en animales indican que algunas células madre inyectadas maduran y se convierten en adultas, pero la mayoría de ellas mueren en el plazo de unos pocos días. Sin embargo, antes de morir segregan una mezcla de proteínas que empujan a las células sanas a dividirse, así como enzimas que rompen las fibras de colágeno del tejido cicatricial y crean espacio para nuevo músculo cardíaco.

Hasta ahora, solo se han realizado algunos ensayos pequeños con humanos. Bolli y sus colaboradores cultivaron un fragmento de tejido cardíaco de 23 pacientes con lesión o insuficiencia cardíaca, Jones entre ellos. Los investigadores hicieron crecer células del corazón en placas de Petri y separaron las células madre mediante la búsqueda de un marcador proteico específico de estas últimas, la molécula c-kit. A continuación, esperaron a que las células madre crearan millones de copias de sí mismas.

Dieciséis pacientes recibieron un millón de esas células a través de un catéter colocado en la arteria coronaria, y siete se acogieron al tratamiento estándar (principalmente, betabloqueantes y diuréticos). Cuatro meses después, la fracción de eyección había aumentado desde una media inicial del 30,3 por ciento hasta el 38,5 por ciento en los pacientes que recibieron células madre, pero apenas había cambiado en el grupo de control (del 30,1 al 30,2 por ciento). Un año después del tratamiento, el peso medio del tejido

ILUSTRACIONES BRYAN CHRISTIE



cicatricial en los pacientes tratados con células madre había disminuido un 30 por ciento.

En un ensayo similar, Eduardo Marbán, del Instituto del Corazón Cedros-Sinaí de Los Ángeles, y sus colaboradores trataron a 17 pacientes con sus propias células madre y a otros 8 con el método tradicional. Marbán y su equipo utilizaron pinzas controladas de forma remota para prender fragmentos de tejido cardíaco (del tamaño de un grano de pimienta) y hacerlo crecer en el laboratorio. Mientras que Bolli había aislado células madre «verdaderas» que producían c-kit al cultivarlas en el laboratorio, Marbán extrajo una mezcla más diversa de células, algunas de las cuales podían tener un efecto más limitado. Los pacientes que recibieron la atención estándar no mostraron un cambio estadísticamente significativo en la masa cicatricial o en el tejido cardíaco sano. Los tratados con células madre presentaron una disminución del 42 por ciento en la masa cicatricial y un aumento de 13 gramos en el tejido sano al cabo de un año, aunque su fracción de eyección apenas mejoró.

Otros investigadores han intentado tratar la insuficiencia cardíaca con células madre mesenquimatosas derivadas de la médula ósea, que resultan de interés porque presentan menor tendencia a volverse cancerosas en comparación con otras células madre. Las células mesenquimatosas segregan factores de crecimiento que promueven la multiplicación de las células cercanas y pueden convertirse en músculo cardíaco en el entorno adecuado. Hasta el momento, los resultados del ensayo no han sido uniformes: mientras que algunos pacientes mejoraron de forma clara, otros apenas mostraron beneficios.

Joshua Hare, de la Universidad de Miami, se preguntó si las personas con cardiopatías tolerarían las células madre de la médula ósea donadas por un extraño o las rechazarían. Administró a 15 pacientes inyecciones de sus propias células, y a otros 15 les inyectó las de donantes. Trece meses después, ninguno de los pacientes de ambos grupos había rechazado las células madre; en todos ellos, el tejido cicatricial había disminuido en más de un tercio. Las personas de edad avanzada pueden sacar mayor provecho de las células madre de donantes jóvenes que de las propias, porque las células más jóvenes no han sufrido tanto desgaste.

«Hasta ahora, no teníamos ninguna manera de eliminar la cicatriz que aparece después de un infarto», observa Hare. «Demostrar que se pueden reducir las cicatrices y sustituirlas por tejido nuevo es el punto de partida que hemos estado buscando. Creo que ello transformará el tratamiento de la insuficiencia cardíaca.»

Un soporte biológico

La matriz extracelular, un adhesivo natural, podría utilizarse para regenerar músculos, tendones y órganos

Christine Gorman

DURANTE AÑOS, los biólogos estuvieron tan centrados en el funcionamiento interno de las células que casi habían ignorado el sistema de adhesión que las mantiene juntas en el organismo, ya sea humano o no. Pero cuando se empezó a estudiar con mayor profundidad la materia que hay entre las células, conocida como matriz extracelular, comenzaron a darse cuenta del enorme dinamismo del conjunto. La matriz no solo proporciona el andamiaje biológico necesario para evitar que los tejidos y los órganos de los animales se desintegren en una masa pegajosa, sino que además libera señales moleculares que, entre otras funciones, ayudan al organismo a curarse a sí mismo.

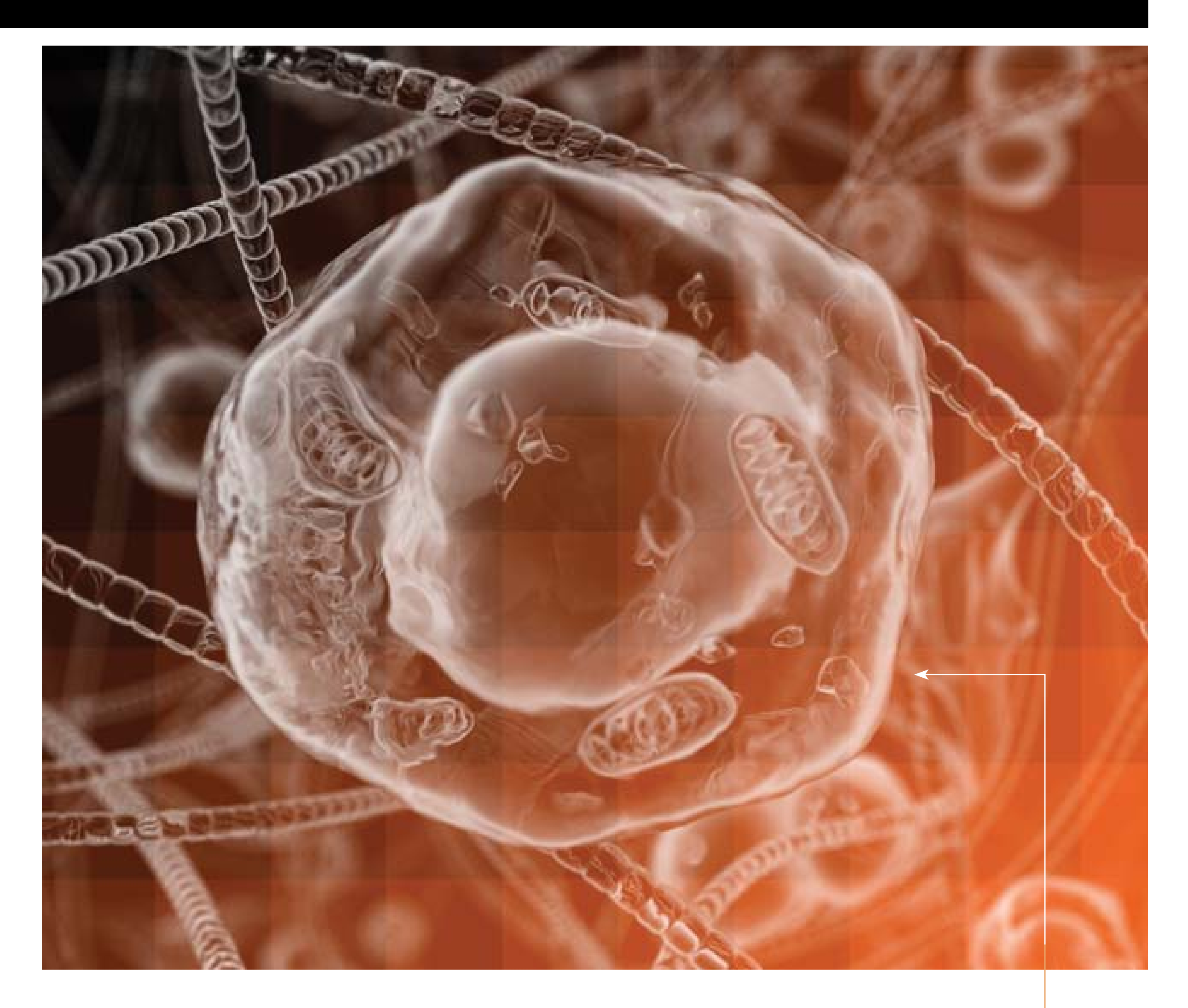
Basándose en ese conocimiento, los investigadores están desarrollando una nueva aproximación a la ingeniería de tejidos, en la que el poder regenerativo del propio andamiaje de la naturaleza cumple una función estelar. La idea consiste en cultivar matriz extracelular de cerdos, por ejemplo, e implantarla en pacientes que sufren una lesión interna importante (después de extraer los componentes que desencadenarían un ataque destructivo del sistema inmunitario del receptor). La matriz recién colocada liberaría moléculas que atraerían a las células madre semiespecializadas del resto de cuerpo para que rellenasen los diversos nichos y se diferenciasen en el tipo de tejido que debería existir allí. Por último, el enrejado implantado se reemplazaría por proteínas y fibras humanas, con lo que se eliminaría cualquier rastro de su origen animal.

El cuerpo se recupera fácilmente de las lesiones pequeñas, pero debe protegerse de las grandes cubriéndolas con tejido cicatricial

Esa visión se está convirtiendo en realidad a un ritmo increíblemente rápido. Hace menos de una década, los cirujanos empezaron a utilizar la matriz extracelular para reparar hernias abdominales, puntos débiles en los músculos y en el tejido de sostén que rodea los intestinos. En la actualidad, están intentando hacer crecer nuevos tendones dentro del cuerpo y, en un futuro no muy lejano, esperan regenerar los principales grupos musculares e incluso órganos. No es de extrañar que el Departamento de Defensa de los EE.UU., con una experiencia desalentadora en el cuidado de soldados que presentan heridas en el pecho, brazos y piernas debido a artefactos explosivos en Irak y Afganistán, financiara muchas de estas investigaciones con decenas de millones de dólares.

CICATRIZACIÓN O REGENERACIÓN

Pocos investigadores se hallan tan bien preparados para impulsar el campo como Stephen Badylak, director adjunto del Instituto McGowan de Medicina Regenerativa en la Universidad de Pittsburgh.



ANDAMIAJE BIOLÓGICO
Una célula (*centro*) dentro de un armazón de fibras de tejido. Al eliminar las células e implantar la estructura restante, los cirujanos convencen al organismo para que regenere sus propios órganos.

Badylak cree que la matriz extracelular podría resultar de especial interés para los supervivientes de explosiones. El cuerpo de los mamíferos, señala, muestra un número reducido de respuestas ante una lesión. Las heridas pequeñas, como los cortes con el papel, desaparecen después de que las células inflamatorias inunden la zona, combatan la infección y eliminen el tejido dañado. En poco tiempo se produce la regeneración completa de la piel normal (sin cicatriz). Sin embargo, los soldados que sobreviven a un atentado en carretera pueden perder del 20 al 80 por ciento de la masa de un grupo muscular en particular. En estos casos graves, apunta el investigador, la lesión supera la capacidad de reparación del organismo y la brecha se llena con tejido cicatricial denso. Ello permite la conexión entre las partes restantes del tejido, pero también provoca una pérdida de función. En tal situación, la mejor opción tal vez consista en amputar el miembro y colocar al herido una prótesis que le proporcione una mayor amplitud de movimiento.

Badylak y sus colaboradores están empleando matriz extracelular para tratar a 80 de esos pacientes con lesiones musculares graves acontecidas al menos seis meses atrás. Después de un régimen intensivo de fisioterapia, diseñado para asegurar que el cuerpo ha sustituido por sí solo tanto músculo como puede, los cirujanos reabren las viejas heridas, eliminan el tejido cicatricial que se ha formado, colocan el andamiaje biológico y lo adjuntan al tejido cercano sano.

Los resultados preliminares resultan prometedores. Las biopsias de músculo tratado han mostrado los mismos cambios bioquímicos que los investigadores observaron cuando desarrollaron la técnica en animales. Si nada se tuerce, Badylak espera publicar los resultados de los primeros cinco pacientes en los próximos meses.



ANATOMÍA INTERNA
El uso ingenioso de moldes de azúcar recubiertos con células tal vez permita reproducir los robustos vasos internos necesarios para transportar el oxígeno hacia el interior de los grandes órganos, como los riñones (*que se muestran aquí*), y para eliminar los desechos que se generan en ellos.

Crear órganos con azúcares

Para construir órganos voluminosos que funcionen con eficacia se necesita hallar la manera de incorporar en ellos vasos sanguíneos

Katherine Harmon

La audiencia de las charlas organizadas por la empresa estadounidense Tecnología, Entretenimiento, Diseño (TED) está acostumbrada a verse cautivada al conocer los distintos avances tecnológicos. Sin embargo, incluso para los estándares de TED, la presentación de 2011 de Anthony Atala, del Instituto de Medicina Regenerativa Wake Forest, despertó un gran asombro. Sin que en un primer momento el público los viese, varios viales y toberas bullían con una misteriosa actividad por detrás de Atala mientras este se hallaba en el escenario. Transcurridos unos dos tercios de la charla, una cámara enfocó la armadura interna del dispositivo. Este zigzagueaba de un lado a otro mientras depositaba sobre una plataforma central, capa a capa, células cultivadas en el laboratorio, basando su actividad en reproducciones digitales tridimensionales muy precisas. El proceso, conocido como impresión en 3D, se asemeja al funcionamiento de las impresoras de inyección de tinta. Pero en este caso, en lugar de tinta, la máquina utiliza una solución de células vivas. Al final, el dispositivo de Atala produjo, capa a capa, un riñón de tamaño natural fabricado con células humanas, del mismo modo que una impresora personal 3D crea una pieza de repuesto de plástico para una cafetera.

Un método rápido y sencillo de crear órganos sería bien recibido por los más de 105.000 estadounidenses que esperan la donación de órganos. Pero el riñón impreso que Atala presentó hace dos años no estaba listo para implantarse. Le faltaban dos elementos cruciales: vasos sanguíneos funcionales y túbulos para la recogida de la orina. Sin estos u otros canales internos, los órganos voluminosos como el riñón no tienen modo alguno de obtener los nutrientes esenciales y el oxígeno, o de eliminar los productos de desecho de las células situadas en su interior, con lo que estas mueren rápidamente. Se ha intentado imprimir esas estructuras mediante la inyección de capas sucesivas de células en el órgano dejando huecos en los lugares correctos en cada nivel. Pero el método produjo conductos que colapsaban y uniones que se rompían al someterlas a la presión de la sangre bombeada por el corazón.

Un equipo de la Universidad de Pensilvania y del Instituto de Tecnología de Massachusetts ha propuesto una solución al problema. En lugar de imprimir un órgano y sus vasos internos a la vez, se imprime primero un molde soluble de los vasos, a base de azúcares y, a continuación, se incorporan las células adecuadas alrededor del molde. Por último se hace disolver el molde, que deja tras de sí los conductos estructuralmente sólidos capaces de hacer frente a las diferentes presiones sanguíneas que existen en el cuerpo.

UN POSTRE INSPIRADOR

La idea provino de Jordan Miller, uno de los investigadores principales del proyecto y becario posdoctoral en la Universidad de Pensilvania, quien se inspiró en dos experiencias personales. Primero, al visitar una muestra de cadáveres y órganos humanos conservados en una exhibición de Body Worlds, vio que los preparadores habían expuesto la estructura entrelazada de los vasos sanguíneos de un órgano de gran tamaño mediante la inyección de silicona en la vasculatura, seguida de la disolución del tejido orgánico restante.

Miller planteó la posibilidad de crear un molde sintético sobre el que construir

los vasos internos. Pero los productos químicos necesarios para disolver la silicona podrían resultar tóxicos para las células vivas que iban a introducirse. La solución a este problema se le ocurrió cuando, en un restaurante de lujo, se le sirvió un postre con una elegante malla de azúcar caramelizado. ¿Por qué no crear un molde de azúcares, que podrían lavarse con agua, para los vasos sanguíneos y otras cámaras de un órgano?

Miller y sus colaboradores modificaron una impresora 3D de código abierto llamada RepRap para imprimir una mezcla de azúcares en forma de filamentos de varios tamaños, desde un milímetro hasta 100 micras de diámetro.

El equipo utilizó los filamentos para crear una versión idealizada de una red vascular y recubrió el armazón resultante con un polímero biocompatible para evitar que los azúcares se disolviesen demasiado pronto. A continuación, los científicos encerraron todo el conjunto en una matriz extracelular [*véase* «Un soporte biológico», *en este mismo artículo*] con células endoteliales del tipo de las que revisten los vasos sanguíneos. Por último, eliminaron el azúcar con agua y obtuvieron así los resistentes vasos sanguíneos compuestos por células vivas.

Luego vino el turno de las células. Al igual que lo hacen en el cuerpo, estas empezaron a remodelar los vasos sanguíneos en los que se hallaban, lo que dio más fuerza a la estructura general e incluso originó capilares diminutos en los extremos de los vasos mayores. Al permitir que las células regeneren pequeñas partes, afirma Chistopher Chen, director del Laboratorio de Microfabricación de Tejidos en la Universidad de Pensilvania, no hay necesidad de reproducir la arquitectura a la perfección. En esencia, el cuerpo puede encargarse de los detalles más finos en un órgano casi completo, con lo que este se vuelve totalmente funcional.

Hasta el momento, Chen, Miller y sus colaboradores han creado fragmentos de tejido hepático que contienen vasos sanguíneos moldeados con azúcar y los han implantado en roedores para demostrar que se integrarán con el sistema vascular de los animales. Tal pequeña cantidad de tejido no puede sustituir la función de un órgano entero, pero cabe imaginar que la incorporación de células hepáticas, renales o pancreáticas a una red vascular completa nos llevará algún día a la impresión en 3D de partes más grandes del cuerpo.

Renovar las neuronas

Los médicos esperan poder algún día reemplazar las células perdidas a causa de los trastornos neurodegenerativos

Ferris Jabr

EN EL INTERIOR DEL CEREBRO HUMANO, las neuronas ramificadas se desarrollan al lado y alrededor de otras, además de sobre estas, igual que lo hacen los árboles de un denso bosque. Antes se pensaba que cualquier neurona que se marchitaba y moría como consecuencia de una lesión o de una enfermedad desaparecía para siempre porque el cerebro no tenía forma alguna de reemplazarla. Sin embargo, en los años noventa del siglo xx, la mayoría de los expertos reconocieron que el cerebro adulto «cultivaba pequeños jardines» de células madre que podían convertirse en neuronas maduras.

Todavía se está intentando determinar la frecuencia exacta con la que esas células se convierten en neuronas, así como el modo en que las células diferenciadas sobreviven y se unen a los circuitos cerebrales existentes. Algunos datos sugieren que las células madre contribuyen de forma modesta a regenerar el cerebro, al sustituir pequeñas poblaciones de neuronas que quedaron destruidas, por ejemplo, durante un accidente cerebrovascular. Pero esta autorreparación mínima no restaura los millones de neuronas que se pierden en un ictus, en una lesión traumática cerebral o en las enfermedades neurodegenerativas como el alzhéimer o el párkinson.

Si el tratamiento con células madre funciona para el párkinson, los médicos podrían tratar una gama más amplia de enfermedades del sistema nervioso

Hace veinte años, los neurocirujanos intentaron superar la limitada capacidad regenerativa del cerebro mediante el injerto de cortes de tejido cerebral fetal en un cerebro enfermo, con el objetivo de sustituir las neuronas muertas por otras nuevas. Los ensayos clínicos resultantes fueron decepcionantes, pero ahora algunos investigadores piensan que han conseguido hacer el tratamiento más seguro y fiable. En lugar de utilizar tejido fetal, se cultivan en el laboratorio millones de neuronas jóvenes a partir de las células madre y se inyectan esas neuronas en el cerebro de los pacientes. Aunque pocos esperan que el tratamiento se aplique de manera amplia antes de una o dos décadas, ya han comenzado los primeros estudios que persiguen este fin.

El trabajo más prometedor hasta ahora se centra en el párkinson, cuyas víctimas parecen responder particularmente bien a los injertos. La enfermedad, que afecta a unos 10 millones de personas en todo el mundo, se produce como consecuencia de la muerte de las neuronas secretoras de dopamina en la sustancia negra, una región del mesencéfalo que interviene en el control del movimiento, entre otras funciones. Los síntomas incluyen temblores, rigidez y dificultad para caminar.

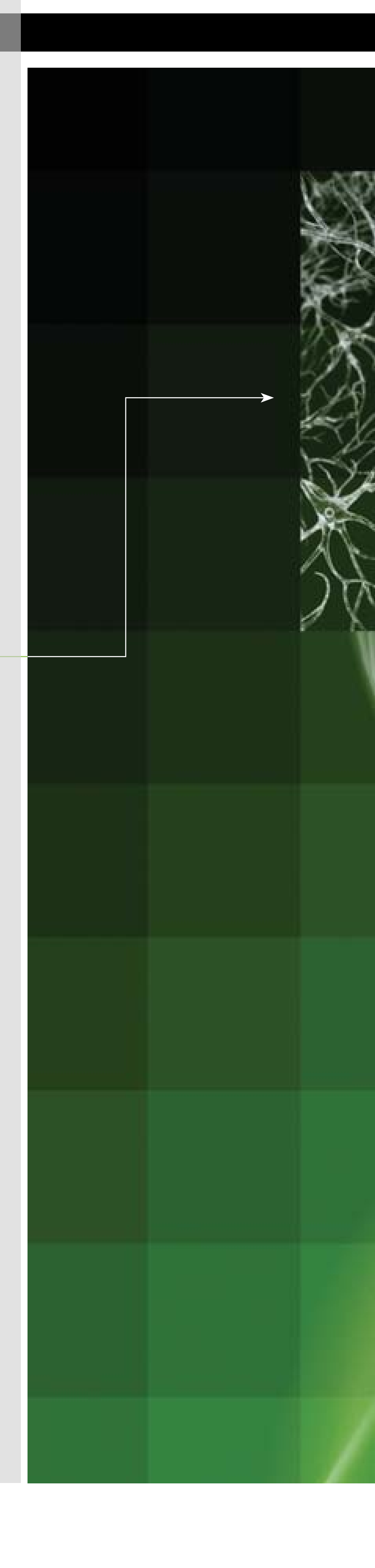
A principios de los años ochenta, los expertos cultivaron tejido cerebral inmaduro de fetos de rata y lo trasplantaron a la sustancia negra de roedores cuyas neuronas dopaminérgicas habían sido eliminadas para imitar el párkinson. A pesar de que las células trasplantadas sobrevivieron a la intervención, no lo-

graron formar circuitos neuronales funcionales. Por lo general, a medida que el cerebro se desarrolla en el útero, las neuronas de la sustancia negra extienden sus ramificaciones hacia otra región del cerebro, el cuerpo estriado, donde expulsan el neurotransmisor dopamina para comunicarse con las células de esa región. En el cerebro fetal, la distancia entre la sustancia negra y el cuerpo estriado no resulta excesiva, pero en el cerebro adulto (incluso en el de la rata), dicha distancia es notablemente mayor, de ahí que, en los primeros experimentos, las neuronas trasplantadas no lograran unir la brecha. En los siguientes estudios se intentó, por tanto, injertar las neuronas inmaduras directamente en el cuerpo estriado, lo que pareció funcionar. Las células sobrevivieron, se entrelazaron en los circuitos neuronales existentes y empezaron a segregar dopamina.

En estudios posteriores con roedores y monos, esos trasplantes han restaurado la dopamina hasta los niveles normales del cerebro y han mejorado las funciones motoras: los animales no tiemblan tanto y muestran un mejor control de los objetos en sus garras. Se especula que los tratamientos funcionan no solo porque las neuronas introducidas liberan dopamina, sino también porque segregan factores de crecimiento, unas sustancias que protegen y nutren a las células receptoras de la dopamina en el cuerpo estriado. Debido a que las neuronas trasplantadas son células vivas que producen, segregan y absorben neurotransmisores de forma continua, pueden equilibrar los niveles de dopamina en el cerebro de los enfermos de párkinson con mayor eficacia que los tratamientos farmacológicos, como la L-dopa.

A principios de los años noventa, cuatro personas con la dolencia habían recibido trasplantes de tejido cerebral fetal en Suecia, un trabajo pionero que dio pie a dos ensayos clínicos más grandes en EE.UU., financiados por los Institutos Nacionales de Salud (NIH), con 40 y 34 participantes, respectivamente. En ambos ensayos, la mitad de los pacientes recibieron trasplantes y la otra mitad se sometieron a cirugía simulada (grupo de referencia). Los resultados fueron desalentadores: los grupos con el implante no mejoraron más que los de control, a excepción de algunos pacientes menores de 60 años de uno de los ensayos.

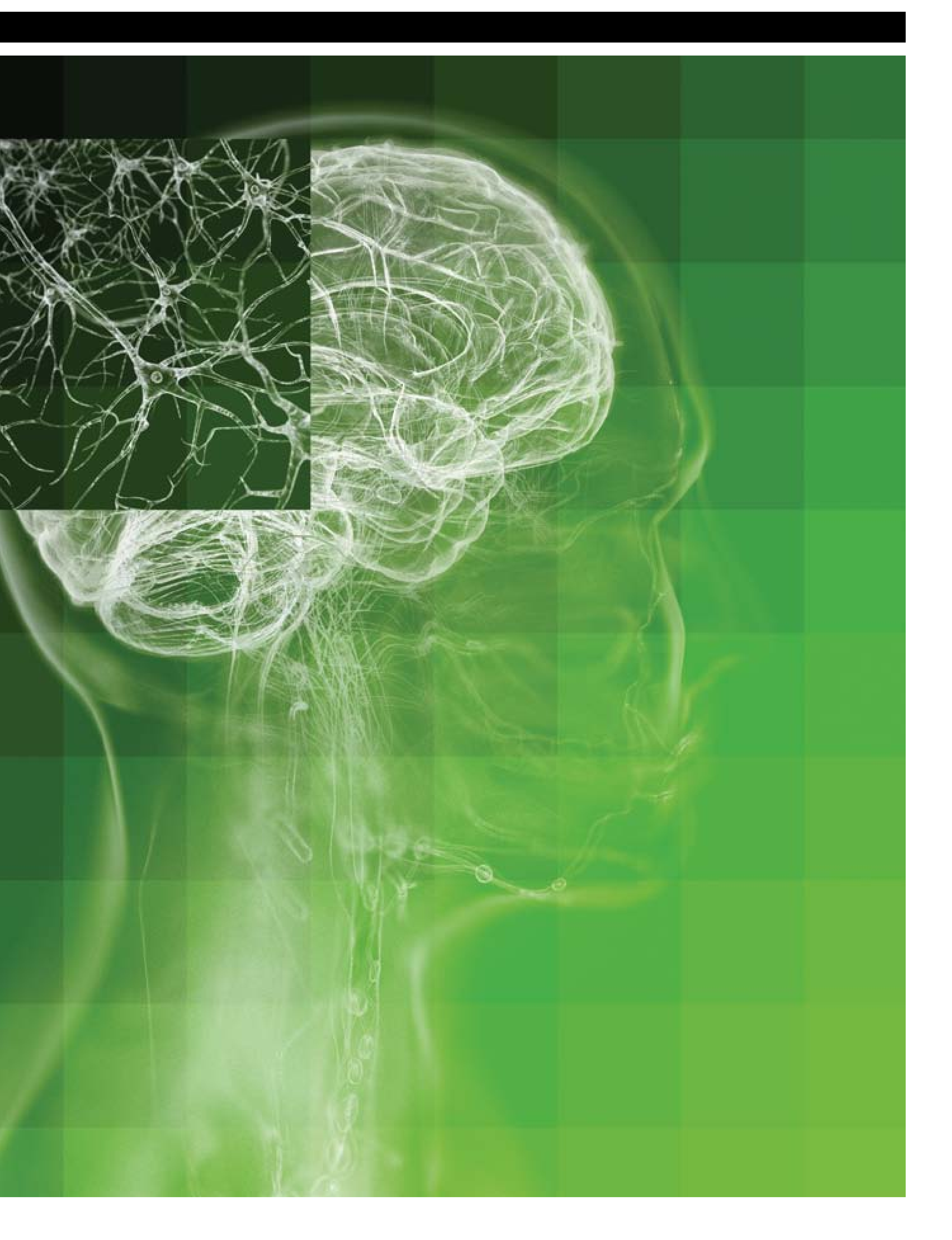
REGENERACIÓN DEL CEREBRO
Para reemplazar las neuronas destruidas en los trastornos neurodegenerativos como el párkinson, se está experimentando con injertos de tejido cerebral fetal y con inyecciones de neuronas jóvenes cultivadas a partir de células madre.

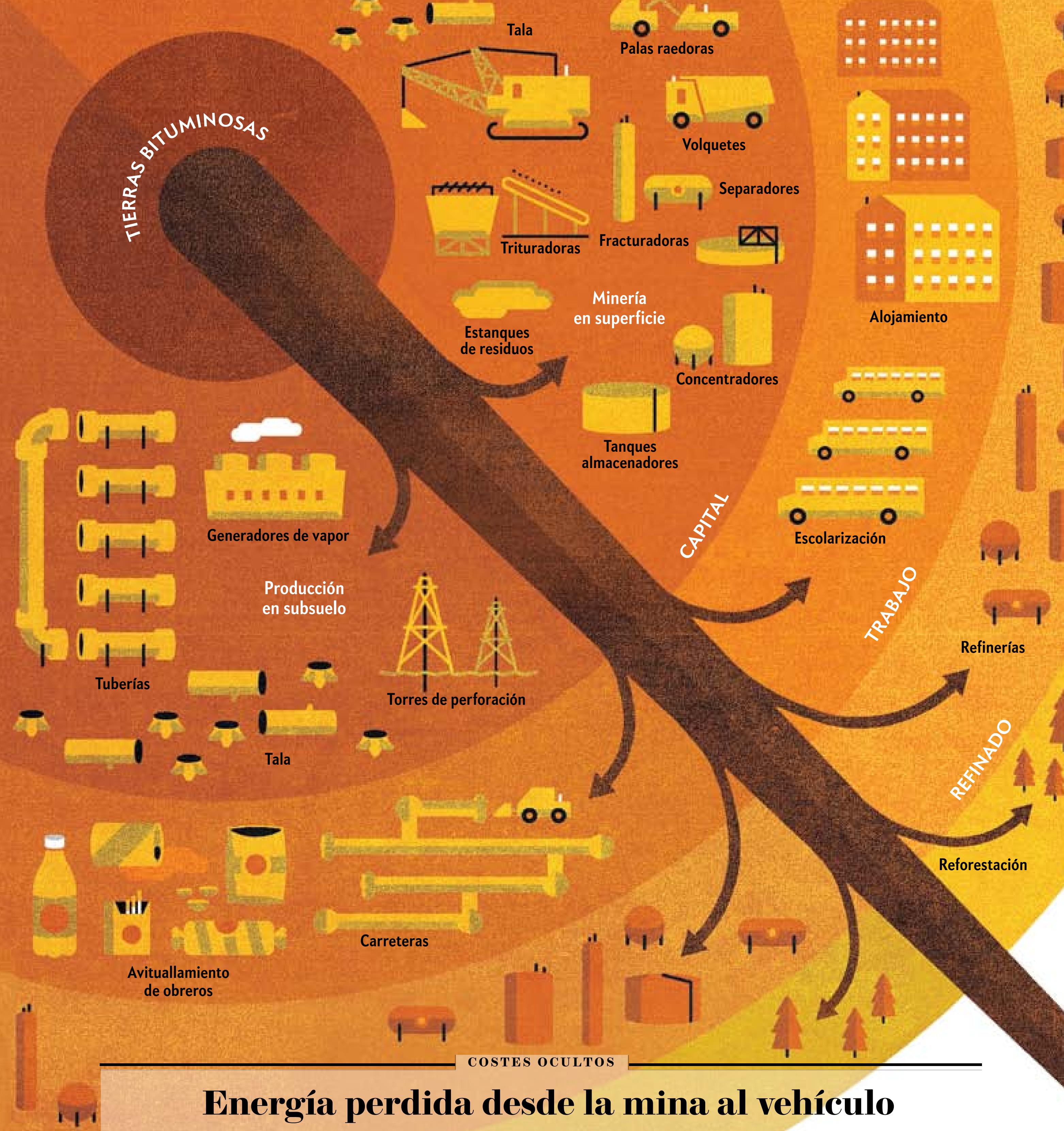


Mientras muchos investigadores consideraron esos ensayos un fracaso, otros veían razones para cuestionar los datos y volver a intentarlo. En primer lugar, resulta difícil estandarizar los trasplantes de tejido fetal, ya que los pacientes suelen recibir muestras de tejido de una calidad variable procedentes de múltiples donantes. En segundo lugar, Anders Björklund, de la Universidad de Lund, y otros investigadores argumentaron que se habían esperado mejoras demasiado pronto en los ensayos. Las neuronas introducidas son tan inmaduras que tal vez requieran varios años para integrarse plenamente en el cerebro. Un estudio de seguimiento de uno de los ensayos financiados por los NIH demostró que dos y cuatro años después de recibir los injertos, algunos pacientes habían mejorado.

Lorenz Studer, del Centro Oncológico Memorial Sloan-Kettering, se ha centrado en una forma diferente de reemplazar las células perdidas a causa del párkinson, una estrategia que resuelve el problema de la estandarización. En el laboratorio, expone las células madre embrionarias a una serie de moléculas que imitan el tipo de señalización química que las células recibirían en el cerebro fetal. Las empuja así hacia una fase determinada del desarrollo equivalente a unos dos meses en el útero, justo después de su última división celular, pero antes de que se haya formado ninguna ramificación larga o intrincada. Debido a que guía con cuidado su crecimiento y desarrollo en el laboratorio, puede generar millones de neuronas jóvenes casi idénticas para el trasplante. Al inyectar las células madre embrionarias indiferenciadas en el cerebro, o en cualquier órgano, existe el riesgo de formación de tumores, puesto que este tipo de células pueden crecer sin control. Ese riesgo se reduce en gran medida si empuja las células madre hacia una forma adulta en el laboratorio. Hasta ahora, Studer ha publicado resultados prometedores con roedores y monos (ambos animales mostraron un mejor control motor) y espera empezar los ensayos clínicos con humanos en tres o cuatro años.

Según Björklund, esas investigaciones abordan una cuestión más amplia: cómo ayudar al cerebro a repararse a sí mismo. El párkinson constituye un banco de pruebas excelente para esta nueva estrategia terapéutica. Si se logra tratarlo con células madre, se abre la posibilidad de atender un espectro más amplio de lesiones y enfermedades del sistema nervioso central.





OLIVER MUNDAY Y JAMES BAMFORD

COSTES OCULTOS

Energía perdida desde la mina al vehículo

Las operaciones que conllevan la extracción y el tratamiento de las tierras bituminosas de Canadá ejemplifican por qué los combustibles no convencionales pueden resultar menos atractivos que los tradicionales, en cuanto a la energía que proporcionan frente a la que se invierte en su producción. Ante todo, se gasta mucha energía en localización, excavación, acarreo, trituración, lavado y calentamiento de las arenas originales para separar el alquitrán que contienen (*anillo interior*). Después, hay que refinar el alquitrán en una planta local (concentrador) para convertirlo en crudo de petróleo normal, el cual finalmente deberá transportarse por tuberías y, a veces, en camiones. Otro método que consume energía consiste en crear vapor para fundir el alquitrán subterráneo. Todas las operaciones, por supuesto, requieren esfuerzo humano (*segundo anillo*). Las refinerías distantes también gastan energía para transformar el crudo en gasolina y otros combustibles. La limpieza posterior requiere purificar con agua y reacondicionar el terreno, consumiendo aún más energía. Los medios tradicionales de perforación, extracción y refinado del crudo convencional exigen una inversión energética mucho menor.

Mason Inman es periodista. Actualmente escribe una biografía del geólogo King Hubbert, creador de la teoría de un cenit en la producción de petróleo.



ENERGÍA

EL COSTE REAL DE LOS *combustibles fósiles*

El encarecimiento del petróleo exige buscar procesos en los que la inversión de energía consiga un óptimo rendimiento

Mason Inman

Los proyectos de explotación de tierras bituminosas abarcan 600 kilómetros cuadrados en el nordeste de Alberta, Canadá. El primer ministro Stephen Harper considera que el esfuerzo industrial para obtener petróleo de tales yacimientos cobra dimensiones épicas, equiparables a la construcción de las pirámides egipcias o la Gran Muralla china.

Ante la creciente dificultad de encontrar reservas de crudo y de gas natural, unida a la expansión de la demanda, las compañías petroleras se orientan hacia recursos menos tradicionales, como las tierras bituminosas, pero de extracción más difícil y onerosa. La producción de petróleo a partir de estos materiales se ha triplicado en los diez últimos años, llegando a 1,6 millones de barriles diarios en 2011.

Dada la necesidad de buscar fuentes de energía alternativas, cabe preguntarse cuáles serían las más recomendables. Ya su mero acceso requiere una gran cantidad de energía, tanto si se trata de pizarras bituminosas como de gas natural obtenido por la fractura hidráulica de esquistos o de antiguos yacimientos de crudo que se inundan de vapor para exprimir más petróleo. Para poder comparar las fuentes de combustible, Charles A. S. Hall, de la Universidad estatal de Nueva York, ha definido un parámetro, la tasa de retorno energético (TRE, o EROI en siglas inglesas), que mide la energía que proporcionan los combustibles por unidad de energía invertida en su elaboración. A mayor tasa de retorno, más energía se obtendrá para la industria. En este artículo examinamos las energías consumidas y los rendimientos obtenidos con distintas fuentes de combustible clasificadas por su TRE.

Hall sostiene que las TRE del crudo de petróleo y del gas están en descenso. Según su modelo, una economía moderna requiere obtener combustible líquido con una TRE superior a cinco; si no se alcanza ese valor, la sociedad está invirtiendo en producir energía cantidades que podrían dedicarse a otros fines como educación o sanidad.

En tales términos, quedan pocas opciones atractivas en el sector del transporte (*véase el apartado* «Combustibles líquidos»). Y no obstante, según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), cada vez se necesitan más combustibles de menor TRE para satisfacer una demanda en continuo aumento. Ya advierte la IEA que los precios del petróleo se sitúan en la «zona de riesgo», amenazando el crecimiento económico. La industria de suministro eléctrico tiene acceso a recursos más abundantes y por ello disfruta de TRE más altas (*véase el apartado* «Energía eléctrica»).

Los valores de la TRE no expresan todas las ventajas e inconvenientes de un combustible; no tienen en cuenta el coste ambiental de las emisiones de gases de efecto invernadero, ni dificultades de suministro tales como la intermitencia de los vientos o de la radiación solar. La TRE revela, sin embargo, cuánta energía cabe esperar de una determinada fuente. Asimismo, refleja en qué grado las medidas para reducir la contaminación podrían tornar prohibitivo el precio de un combustible. Las comparaciones de la energía consumida con la energía producida sirven para orientar la inversión hacia las fuentes que mantengan más viva la economía, y así colaborar en la construcción de un futuro sostenible.

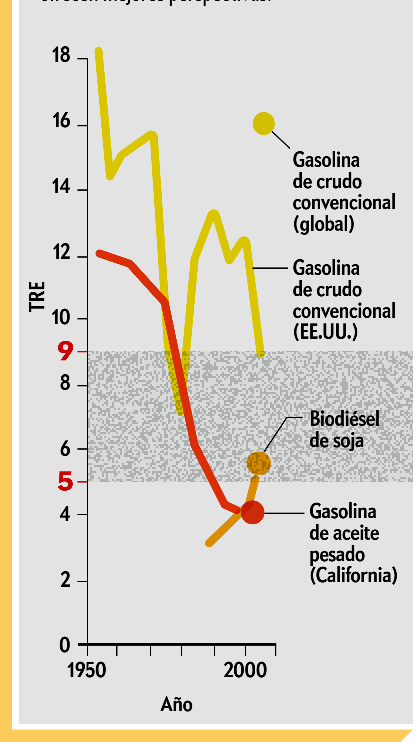
GANADORES Y PERDEDORES

Decadencia de la energía barata

Numerosos expertos sostienen que los combustibles líquidos de alta calidad y extracción económica están en retroceso, y obligan a recurrir a fuentes de energía cuya producción es más onerosa. Tal situación queda de manifiesto a través de la TRE (energía producida por cada unidad de energía invertida en su producción). El petróleo convencional ofrece una TRE mucho más favorable que otras fuentes de combustibles líquidos (*gráfica derecha*), pero su puntuación desciende acusadamente (*gráfica inferior*). Las fuentes de energía eléctrica también presentan TRE elevadas (*abajo a la derecha*), que pueden compensar con creces su utilización en el transporte (*extremo derecho*). «Terminó la era de la energía barata», afirmaba Nobuo Tanaka en 2011, cuando era director de la Agencia Internacional de la Energía.

Caen las ventajas del petróleo

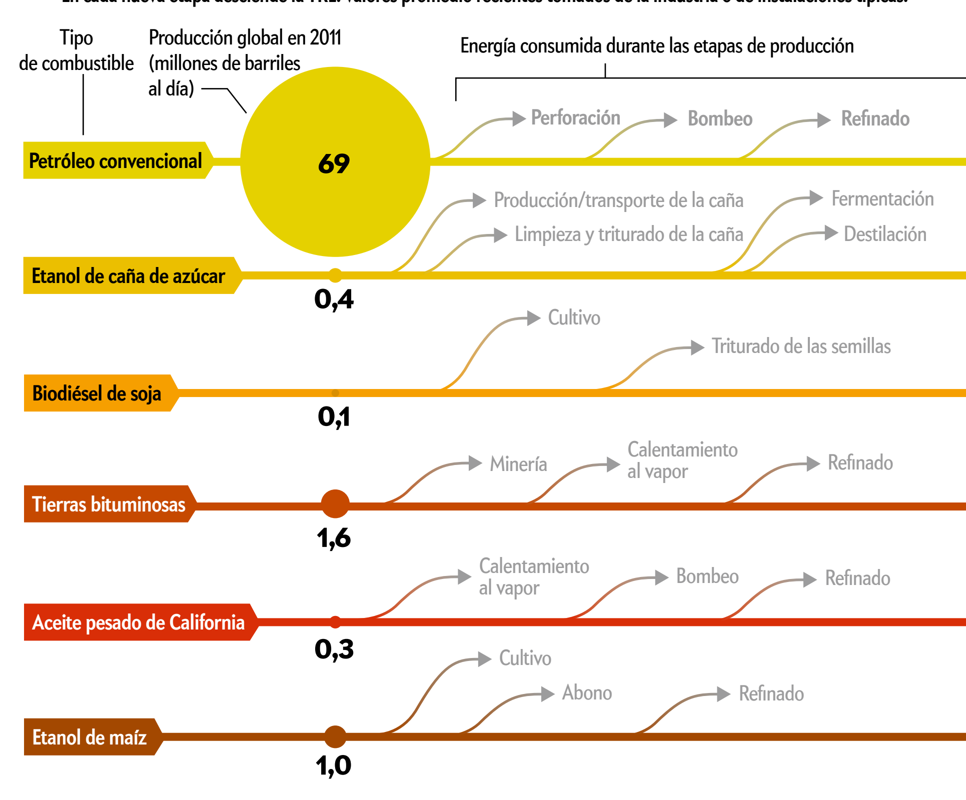
La economía moderna requiere combustibles cuya TRE sea al menos cinco. El petróleo de fuentes convencionales ha superado ese umbral durante décadas, pero ahora ya retrocede. Los aceites pesados (petróleo más denso formado por cadenas de hidrocarburos más largas) consumen más energía en su producción, por lo que presentan TRE más bajas. Pero hay otros combustibles, como el diésel obtenido de semillas de soja, que ofrecen mejores perspectivas.



FUENTES DE DATOS: AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA; ADMINISTRACIÓN DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA DE EE.UU.; DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE EE.UU.; ESTUDIOS DE CHARLES A. S. HALL Y OTROS INVESTIGADORES; JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

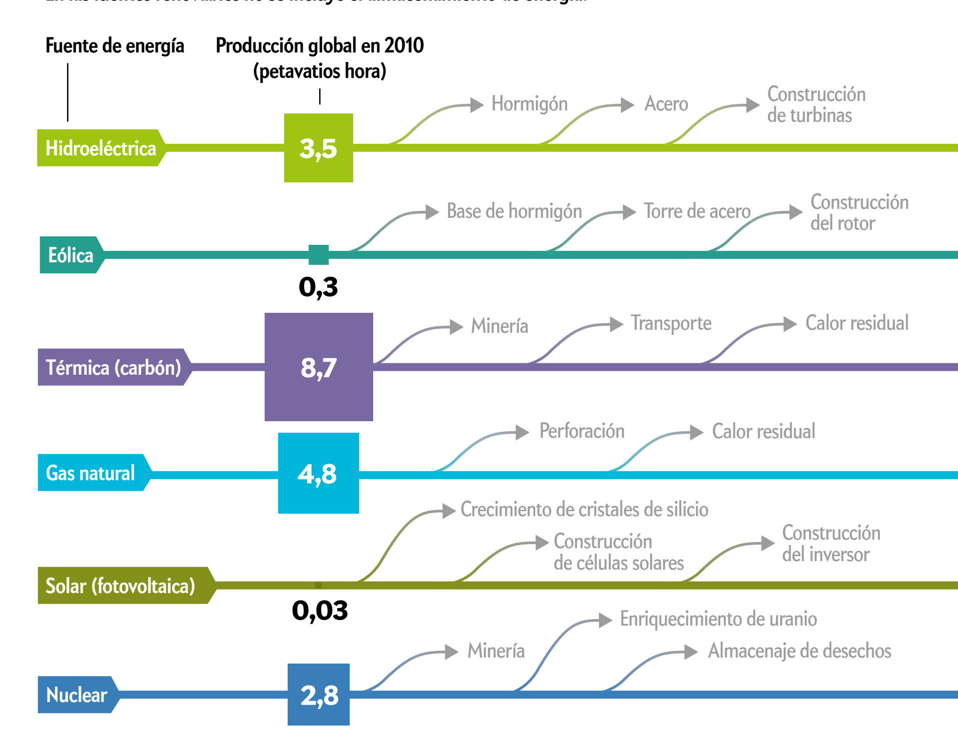
COMBUSTIBLES LÍQUIDOS: El crudo de petróleo da hoy el mayor rendi

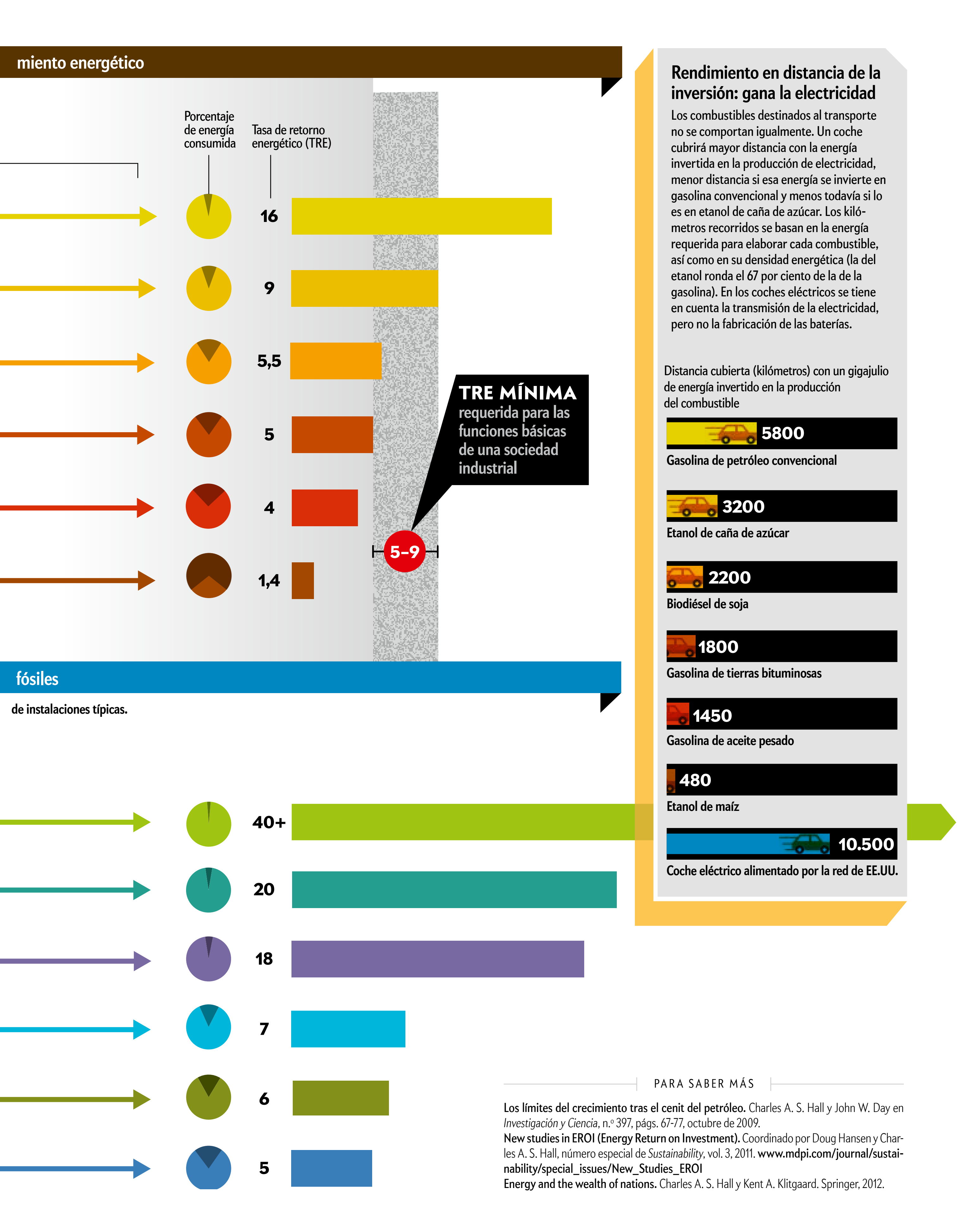
Toda materia prima ha de ser extraída (de yacimientos de crudo o vegetación) y refinada en gasolina u otros combustibles. En cada nueva etapa desciende la TRE. Valores promedio recientes tomados de la industria o de instalaciones típicas.



ENERGÍA ELÉCTRICA: Las fuentes renovables compiten con los combustibles

La generación de electricidad cubre una amplia gama de TRE. Valores promedio recientes tomados de la industria o En las fuentes renovables no se incluye el almacenamiento de energía.





PARA SABER MÁS

Los límites del crecimiento tras el cenit del petróleo. Charles A. S. Hall y John W. Day en *Investigación y Ciencia*, n.º 397, págs. 67-77, octubre de 2009.

New studies in EROI (Energy Return on Investment). Coordinado por Doug Hansen y Charles A. S. Hall, número especial de *Sustainability*, vol. 3, 2011. **www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/New_Studies_EROI**

Energy and the wealth of nations. Charles A. S. Hall y Kent A. Klitgaard. Springer, 2012.



Todos a bordo: El cohete Falcon 9 de SpaceX lanzó la cápsula Dragon en 2010. Era la primera vez que una empresa privada lograba poner una nave en órbita y devolverla sana y salva a la Tierra.



INVESTIGACIÓN ESPACIAL DE BAJO COSTE

Los vuelos privados al espacio no serán solo para turistas adinerados. Una naciente industria promete revolucionar las misiones científicas

S. Alan Stern

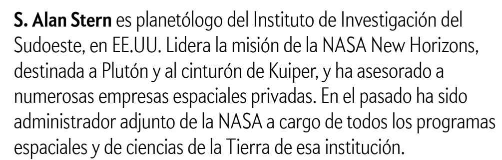
EN SÍNTESIS

Las misiones espaciales se ven afectadas desde hace tiempo por el elevado coste de los lanzamientos y su escasa frecuencia. Un emergente sector de empresas privadas podría reducir los precios de manera drástica.

Aunque dichas compañías nacieron para llevar turistas al espacio, muchas consideran ahora la posibilidad de enviar misiones científicas. Su bajo coste beneficiaría a múltiples instituciones de tamaño medio de todo el mundo.

El futuro de las empresas espaciales privadas podría ir más allá de los vuelos suborbitales. Varias compañías ya están proyectando misiones orbitales, pequeñas estaciones espaciales e incluso vehículos de alunizaje.

CORTESÍA DE SPACEX



S. Alan Stern es planetólogo del Instituto de Investigación del Sudoeste, en EE.UU. Lidera la misión de la NASA New Horizons, destinada a Plutón y al cinturón de Kuiper, y ha asesorado a numerosas empresas espaciales privadas. En el pasado ha sido administrador adjunto de la NASA a cargo de todos los programas espaciales y de ciencias de la Tierra de esa institución.



Uno de los problemas más enojosos

de la investigación espacial radica en que, en cincuenta años, apenas ha cambiado la manera de acceder al espacio. Las misiones continúan resultando caras y poco frecuentes. A diferencia de los oceanógrafos, que se sumergen de manera rutinaria en las profundidades del océano, o los geofísicos, que organizan sin dificultades expediciones a los polos, los científicos espaciales sufren aún serias dificultades para realizar sus investigaciones en el ambiente que les es propio.

La emergencia de compañías espaciales con ánimo de lucro podría cambiar tales circunstancias. Así quedó patente el año pasado, cuando la cápsula de carga Dragon, construida y controlada por la empresa SpaceX, alcanzó con éxito la Estación Espacial Internacional (ISS). Tales misiones ofrecerán a los investigadores menores costes de lanzamiento, un acceso mucho más frecuente al espacio y la oportunidad de efectuar en persona sus experimentos. Estos avances no solo ayudarán a los grandes proyectos de investigación de las agencias estadounidense, europea o japonesa, sino que probablemente facilitarán también que un amplio espectro de naciones, instituciones académicas y empresas lleguen al espacio.

Mi interés por el potencial de los vuelos espaciales comerciales nació cuando ocupaba el puesto de administrador adjunto de la NASA a cargo de todos los estudios de ciencias de la Tierra y el espacio. Desde entonces, he asesorado a empresas espaciales, he trabajado como investigador principal en dos de los equipos del concurso Google Lunar XPRIZE y he contratado vuelos espaciales comerciales con fines científicos a través de la institución a la que pertenezco, el Instituto de Investigación del Sudoeste, con sede en Texas. Como tal, he sido testigo directo de las promesas que ofrece esta industria.

La gran variedad de sistemas comerciales que estarán disponibles dentro de unos años ofrecerá todo tipo de oportunidades a los científicos espaciales, un gremio que viene demostrando su ingenio desde los días posteriores a la Segunda Guerra Mundial, cuando comenzó a convertir los cohetes V2 alemanes en plataformas de investigación. Aunque algunos de los proyectos actuales acaben tambaleándose, otros sin duda tendrán éxito. Y en el contexto actual de presupuestos ajustados, sobrecostes y un acceso al espacio paralizado, ese éxito nunca llegará demasiado rápido.

Pienso que las décadas de 2010 y 2020 resultarán tan decisivas para el futuro de la exploración espacial como lo fueron los años cincuenta y sesenta del siglo pasado. De hecho, ya estamos siendo testigos de una revolución en ciernes. Desde los vuelos suborbitales que suelen ofrecerse como aventuras turísticas, pero en los que también habrá plazas para científicos, hasta los vuelos orbitales a la ISS y más allá, los próximos años remodelarán nuestra relación con el mundo, aún misterioso, que se alza por encima de nuestro planeta.

EL FUTURO SUBORBITAL

Uno de los proyectos espaciales más productivos de la NASA —y, por desgracia, quizá también el menos conocido— ha sido su programa de vuelos suborbitales. Desde hace décadas, la agencia ha venido lanzando cada mes una o dos misiones espaciales breves a bordo de cohetes desechables no tripulados. Ello ha brindado a numerosos investigadores la oportunidad de transportar sus instrumentos al espacio durante unos minutos. A pesar de la concisión de los vuelos, las misiones suborbitales han generado resultados científicos de primer orden en física solar, estudios de supernovas, física de la atmósfera superior, astrofísica e investigación sobre cometas. Además, han mostrado su valía como campo de pruebas técnico para naves y sensores espaciales antes de que se emprendiesen misiones de miles de millones de dólares. También han servido para adiestrar a innumerables experimentadores espaciales, algunos de los cuales se cuentan hoy entre los astrónomos, científicos atmosféricos y directores de misiones planetarias mejor reputados de EE.UU.

Pero, a pesar de las repetidas solicitudes por parte de la comunidad científica durante los últimos veinte años, la cadencia de tales vuelos ha permanecido en niveles frustrantes. Las razones son múltiples, pero el problema principal puede acha-



Cadena de suministros: **La primavera pasada, la cápsula Dragon de SpaceX entregó suministros a la Estación Espacial Internacional.**

CORTESÍA DE SPACEX

carse a un coste excesivo. El precio medio de una de tales misiones asciende a 2,5 millones de dólares, lo que, a la vista del presupuesto del programa suborbital de la NASA, no deja lugar para vuelos mucho más frecuentes.

No obstante, la aparición de nuevos vehículos suborbitales reutilizables, construidos por compañías como XCOR Aerospace, Virgin Galactic, Armadillo Aerospace, Masten Space Science o Blue Origin, ha propiciado todo tipo de avances que prometen mejoras tanto en el ritmo como en la productividad de la investigación suborbital.

¿Cómo ha ocurrido algo así? En primer lugar, el uso de lanzadores reutilizables en lugar de los desechables ha permitido reducir de manera drástica los costes y aumentar la frecuencia de los vuelos. Estas dos mejoras clave bien podrían significar para la investigación espacial lo mismo que el PC supuso en su momento para la informática: una revolución en el acceso. Hoy por hoy, la NASA efectúa entre 20 y 25 lanzamientos suborbitales al año. Virgin Galactic espera que su primer vehículo proveedor de tales vuelos opere una vez al día, con una capacidad para seis estantes de carga útil o seis investigadores (o una mezcla de ambos) en cada viaje. Es decir, la compañía podría llegar a facilitar unas 2000 oportunidades al año para realizar todo tipo de experimentos.

Virgin Galactic no se encuentra sola en el nuevo mercado. XCOR Aerospace, una de sus mayores competidoras, espera ejecutar cuatro lanzamientos diarios con cada uno de sus vehículos reutilizables, varios de los cuales ya han sido arrendados a países como Corea del Sur o Curazao. Con semejante frecuencia de vuelos, no resulta difícil aventurar la velocidad con la que avanzarían algunos campos de investigación. Los biólogos, por ejemplo, podrían adquirir enormes cantidades de datos sobre las condiciones de los astronautas en gravedad cero. En la actualidad, solo contamos con unos pocos estudios al respecto.

Pero un aumento en la frecuencia de los vuelos no traerá por sí solo una revolución. El segundo elemento clave lo proporcionará la reducción de costes que implican los sistemas reutilizables. Virgin Galactic planea cobrar 200.000 dólares por una carga útil de 90 kilogramos o por una plaza para un investigador en una misión suborbital: unas diez veces más barato que un lanzamiento en un cohete tradicional. Los precios estimados de las empresas XCOR y Armadillo Aerospace rondan los 100.000 dólares.

Por otro lado, los cohetes reutilizables fomentarán la adquisición de nuevos conocimientos científicos. Con un acceso frecuente a la región que algunos han dado en llamar *ignorosfera* (demasiado alta para alcanzarla con aviones, pero demasiado baja para que los satélites desciendan hasta ella sin que se precipiten sobre la Tierra), los investigadores tendrán por fin la oportunidad de estudiar todo tipo de fenómenos atmosféricos, como las misteriosas descargas eléctricas conocidas como duendes y chorros azules.

Los nuevos vehículos ofrecen también la posibilidad de que los científicos viajen junto con la carga útil. Por primera vez, la investigación espacial podría empezar a desarrollarse en el mismo ambiente del que goza cualquier otra disciplina: un laboratorio en el que los expertos lleven a término sus experimentos sin necesidad de ayuda robótica.

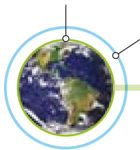
Aunque gran parte de lo descrito hasta aquí tal vez suene a ciencia ficción, algunos investigadores ya han comenzado a reservar vuelos para sus experimentos y para ellos mismos. Al igual que en los años cincuenta los cohetes sonda dejaron de ser una rareza para convertirse en rutina, la próxima generación de vuelos suborbitales podría comenzar a florecer hacia mediados de esta década. Pos sí solo, ello ya implicaría un cambio notable en los programas de investigación espacial. Pero, además, tales vuelos podrían suponer el primer escalón en toda una serie de nuevas posibilidades comerciales de claro interés para los investigadores.

NUEVAS MANERAS DE ALCANZAR LA ÓRBITA

La mayoría de los vehículos de lanzamiento que la NASA ha venido usando hasta ahora en sus misiones orbitales (los cohetes

Quién es quién en la revolución espacial

Llegar al espacio es difícil. La investigación espacial sufre desde hace mucho los elevados costes y las escasas oportunidades de vuelo. Un número creciente de compañías privadas podría aliviar esa situación. Las que citamos aquí solo representan a las más relevantes. Docenas de ellas esperan facilitar en un futuro próximo el acceso al espacio.



	SUBORBITAL	ORBITAL	LUNA	ESTANCIAS PROLONGADAS
PRINCIPALES EMPRESAS	Armadillo Aerospace, Blue Origin, Virgin Galactic, XCOR Aerospace	SpaceX	Astrobotic Technology, Moon Express	Bigelow Aerospace, Excalibur Almaz
VENTAJAS SOBRE EL MÉTODO TRADICIONAL	Los lanzadores reutilizables permiten reducir el plazo entre vuelos y rebajar el coste de cada misión. También los investigadores podrían viajar al espacio y realizar allí sus experimentos.	SpaceX diseñó sus cohetes Falcon y sus cápsulas Dragon partiendo de cero, con énfasis en la simplicidad y la fiabilidad. Los vuelos en el Falcon 9 cuestan la mitad que un vuelo similar de las grandes agencias espaciales.	Sus pequeños módulos robóticos serán las primeras naves espaciales que realicen un alunizaje suave desde que la misión soviética Luna 24 lo lograra en 1976. Hay planes para explorar la existencia de agua helada cerca del polo sur lunar.	Las estaciones hinchables de Bigelow son ligeras, lo que facilita su puesta en órbita con respecto a las estaciones rígidas, como la Estación Espacial Internacional (ISS). También pueden expandirse hasta volúmenes mayores de los que puede transportar un cohete.
ESTADO ACTUAL	Los vuelos de pruebas ya se encuentran en marcha. Los primeros pasajeros se prevén para una fecha tan cercana como el año próximo. Virgin Galactic anunció hace poco un programa de cohetes orbitales para 2015.	El cohete Falcon 9 ya fletó una cápsula Dragon para una misión de reabastecimiento de la Estación Espacial Internacional. Fue la primera de 12 previstas.	El concurso Google Lunar XPRIZE premiará al primer equipo no gubernamental que haga alunizar un robot y enviar un vídeo a la Tierra. Moon Express, uno de los equipos líderes, planea lanzar su misión en 2015.	Bigelow comenzó las pruebas de sus prototipos en órbitas bajas en 2006. La NASA anunció recientemente que acoplaría un módulo de Bigelow a la ISS en 2015. La primera colonia orbital se prevé para 2016.

NASA (*Tierra y Luna*)

Pegasus, Atlas y Delta) han incrementado su coste en más del doble desde finales de los años noventa. Enviar una pequeña misión científica a bordo de un Pegasus solía costar 15 millones de dólares; hoy, su precio supera los 40 millones. Y el de los cohetes de altas prestaciones, aptos para transportar cargas útiles de mayor tamaño (los elevadores pesados, como el Atlas V), ha subido de 150 a 350 millones de dólares.

Con un presupuesto exprimido por las dificultades económicas y los constantes sobrecostes, los directores científicos de la NASA podrían ver en las empresas espaciales una bendición. A modo de ejemplo, consideremos la serie de lanzadores Falcon de SpaceX. La compañía concibió, diseñó, desarrolló, probó y puso en funcionamiento la serie Falcon por menos dinero que el que necesitó el Gobierno estadounidense para construir la torre de lanzamiento de su ya caduco cohete Ares. SpaceX ofrece ahora el Falcon 9 por 65 millones de dólares, aproximadamente la mitad de lo que cuesta el Delta II, su competidor para lanzamientos medianos. Para 2014, SpaceX planea poner en marcha un modelo mucho mayor, el Falcon Heavy. Este podrá transportar aproximadamente el doble que los Atlas o Delta de mayor capacidad, pero por solo 100 millones de dólares, menos de un tercio del precio de sus competidores.

En el pasado, la NASA ha venido lanzando entre tres y cinco misiones orbitales al año. Si solo la mitad de ellas hubiesen viajado en un Falcon Heavy, la agencia habría ahorrado unos 2000 o 3000 millones de dólares en cinco años. Ese dinero bastaría para financiar varias misiones de tipo Discovery hacia otro planeta, casi diez Small Explorer (empleadas en astronomía y física solar) o incluso un nuevo buque insignia similar al *Curiosity* como vehículo de exploración marciana.

Otra opción para ahorrar consiste en alojar cargas de carácter científico en vuelos comerciales. Por ejemplo, cada una de las 72 naves de la red de satélites de comunicación Iridium de segunda generación alquila espacio a bordo. La misión anfitriona asume la mayor parte de los costes del lanzamiento y los del satélite, mientras que el instrumento científico solo abona una pequeña fracción. Hoy en día, esta práctica de alojar cargas útiles ajenas se circunscribe a un mercado minoritario: solo resulta aplicable cuando los instrumentos científicos caben a bordo de un satélite de comunicaciones y, además, pueden funcionar en sus órbitas especializadas. Otros aparatos, como los

grandes telescopios, necesitan sus propios satélites. A pesar de ello, este método ofrece una oportunidad para enviar cargas modestas por unas docenas de millones de dólares, en lugar de los cientos de millones que suelen necesitarse para lanzar y operar un satélite propio.

HACIA LA LUNA Y MARTE

El alquiler de espacio de a bordo podría servir para llevar instrumentos científicos mucho más allá de la órbita terrestre. En estos momentos, más de una docena de equipos de Europa, América del Norte, Asia y otros lugares toman parte en la competición Google Lunar XPRIZE, que recompensará a los primeros consorcios privados que logren llevar una misión robótica a la Luna con premios por valor de más de 30 millones de dólares [*véase* «Destino: la Luna», por Michael Belfiore; Investigación y Ciencia, junio de 2012].

Equipos como Moon Express o Astrobotic ya están firmando contratos para transportar equipos científicos a la Luna. Estas y otras empresas consideran que el premio Lunar XPRIZE constituye solo un primer paso. A largo plazo, lo que se persigue es crear un flujo constante de ingresos procedentes de investigadores o naciones que no disponen de cientos de millones de dólares ni de la experiencia técnica necesaria para llegar a la Luna, pero que sí pueden permitirse alquilar espacio a bordo de un vehículo de alunizaje ajeno. En el fondo, una tarifa de 10 millones de dólares sigue siendo cien veces más barata que los 1000 millones de dólares de las misiones gubernamentales pasadas. No pocos planetólogos y científicos lunares se muestran optimistas ante la idea de que tales precios permitan que muchos más países envíen experimentos a la Luna y contribuyan a un nuevo renacimiento en el estudio del «quinto planeta rocoso» (después de Mercurio, Venus, la Tierra y Marte).

Los cohetes reutilizables permitirán estudiar la *ignorosfera*, una región demasiado elevada para los globos y demasiado baja para los satélites

Más allá de la Luna, SpaceX está considerando la posibilidad de adaptar sus cápsulas Dragon para llegar hasta Marte. Eso ahorraría cientos de millones de dólares con respecto a los últimos vehículos que han aterrizado en el planeta rojo. Si SpaceX convence a la NASA o a las agencias espaciales de otros países, tal vez veamos nacer un programa de investigación marciana asequible en un momento en que las grandes agencias espaciales de todo el mundo se debaten para conseguir fondos para ese fin.

ESTACIONES ESPACIALES PRIVADAS

Solo un 10 por ciento de las 194 naciones de la Tierra son socias de la ISS. El 90 por ciento restante carece de buenas perspectivas para acceder a esa gran y única estación espacial. Para naciones como China, India o Corea del Sur, las estaciones espaciales privadas podrían constituir la mejor oportunidad para ampliar su acceso al espacio e investigar sobre microgravedad, física fundamental, tecnología y biología espaciales, por no hablar del prestigio nacional que ello supone.

La primera de tales iniciativas, y probablemente la más conocida, es Bigelow Aerospace. Sin excesiva fanfarria, esta compañía ya ha construido dos prototipos de estación espacial para órbitas bajas, los cuales se encuentran ahora en fase de pruebas. Con acomodo para un máximo de seis investigadores, la primera estación de Bigelow diseñada para seres humanos doblará el número de científicos en órbita en un momento dado. Gracias a ello y a los taxis espaciales privados, como el CST-100 proyectado por Boeing o las cápsulas Dragon, de SpaceX (ambas diseñadas para transportar humanos hacia la ISS), la estación de Bigelow bien podría acabar facilitando que investigadores, agencias y empresas accedan al espacio por la mitad o menos de lo que cuesta un Soyuz y una estancia en la ISS.

Bigelow no se halla sola en ese empeño. Otra compañía, Excalibur Almaz, planea construir una estación similar, aunque de menor envergadura. Para ello, pretende usar módulos sobrantes de la estación espacial de la era soviética, así como vehículos de transporte de tripulación de dicha época.

A largo plazo, también las cápsulas Dragon de SpaceX podrán usarse a modo de estaciones espaciales. En la actualidad, la NASA ha contratado dichos vehículos para llevar carga de ida y vuelta a la ISS y, en un futuro cercano, también deberían transportar astronautas. No obstante, las cápsulas de SpaceX podrían ser mucho más versátiles. La compañía está planeando misiones DragonLab que, con y sin tripulación, volarían hasta una órbita terrestre y permanecerán allí durante semanas o meses mientras llevan a cabo proyectos de investigación con equipo propio o ajeno. Esperan hacerlo a un coste inferior al que probablemente ofrezcan las estaciones espaciales comerciales.

VOLVER AL CIELO

Las innovaciones presentadas aquí representan las primeras ideas verdaderamente nuevas para acceder al espacio desde los años cincuenta y sesenta del siglo pasado, cuando la investigación suborbital, las misiones planetarias y los satélites orbitales alcanzaron su madurez. A pesar de ello, aún nos encontramos ante las primeras etapas de esta floreciente revolución. Aún restan numerosas cuestiones por resolver. ¿Con qué profundidad afectará la emergencia de empresas privadas al modo de hacer ciencia en el espacio? ¿En qué medida motivarán a la opinión pública? ¿Cuánto tardarán otros emprendedores en sumarse a esta revolución? En gran parte, las respuestas dependerán del grado de innovación de los investigadores y las agencias espaciales, así como de la rapidez con la que aprendan a adaptarse y a aprovechar el nuevo contexto.

Si los proyectos suborbitales y orbitales que ya están en marcha tienen éxito, tal vez abran nuevos caminos en la exploración de los asteroides, planetas y satélites del sistema solar. La ciencia podría beneficiarse tanto como lo hizo cuando las primeras expediciones privadas se adentraron en las regiones polares. Sin duda, todas estas predicciones son un ejemplo en el que el límite no está en el cielo.

Órbita lunar (384.000 km)

PARA SABER MÁS

Rocketeers: How a visionary band of business leaders, engineers, and pilots is boldly privatizing space. Michael Belfiore. Harper Perennial, 2008.

Aerolíneas espaciales. David H. Freedman en *Investigación y Ciencia* n.º 413, febrero de 2011.

Programa comercial de tripulaciones y cargas de la NASA: **www.nasa.gov/offices/c3po/home**

Federación de Vuelos Espaciales Comerciales: **www.commercialspaceflight.org**





CONSERVACIÓN

Reservas marinas y población local

Los habitantes del archipiélago indonesio de Raja Ampat lideran los esfuerzos para proteger los arrecifes de coral de los estragos de la pesca. Con ello intentan defender también su propia subsistencia

Brendan Borrell

Pescadores a bordo de canoas de madera acechan a sus presas en las bulliciosas aguas de Raja Ampat, mientras los pejerreyes nadan alrededor de un islote.

Brendan Borrell, colaborador habitual de *Scientific American* y *Nature*, escribe sobre ciencia y medioambiente. Posee una beca de la Fundación Alicia Patterson, que promueve el periodismo, para el año 2013.



Una noche serena de agosto, Dortheus Mentansan se desliza por el océano en calma a bordo de una canoa con balancín y una linterna atada en la proa. Menudo, solemne y capaz de remar con la precisión otorgada por treinta años de práctica, Dortheus se considera descendiente del primer clan que se asentó en los alrededores de la bahía de Mayalibit, en el remoto archipiélago indonesio de Raja Ampat. Las nubes ocultan la luna, pero el pescador navega sin problemas.

Al poco rato, en el agua iluminada por la linterna aparecen unas formas grises; se trata de jureles que, con movimientos rápidos, desaparecen y emergen de nuevo. Dortheus dirige las presas hacia el entrante de un risco calizo, donde las rocas pardorrojizas forman un corral somero. La superficie del agua bulle con el chapoteo de dos docenas de peces centelleantes. El hombre desembarca, con el agua hasta los tobillos, y con una red triangular lleva los peces a la canoa, donde se golpean contra los laterales durante varios minutos, boqueando de forma mecánica.

Es un método de pesca implacable y que solo unos pocos forasteros, cinco según las cuentas de Dortheus, han visto alguna vez. La linterna parece anular el sentido de orientación de los jureles. Aunque algunos aldeanos utilizan ese método para capturar un número excesivo de peces, Dortheus toma solo los necesarios. Intenta dar ejemplo, ya que la sobrepesca ha agotado los lugares de puesta.

Hace dos años, su comunidad prohibió la pesca en una zona situada al norte, y la iglesia local ordenó a los aldeanos no pescar en sábado para que ciertos jureles, conocidos en la zona como *lema*, pudieran desovar. Tales acciones forman parte de un proyecto a mayor escala para que la población local gestione los recursos marinos y proteja la biodiversidad. Los conservacionistas han aprendido a las malas que si los habitantes no aceptan las medidas que les son impuestas, pueden ignorar cualquier norma. Esta enseñanza se ha llevado al extremo en los centenares de islas, arrecifes de coral y manglares de Raja Ampat, donde se ha ofrecido ayuda a individuos como Dortheus para liderar el proceso, diseñar programas de conservación, evaluar el uso de los recursos y hacer cumplir las normas.

El objetivo último de enrolar a Dortheus y otros como él es garantizar que la conservación del diverso Triángulo de Coral, comprendido entre Bali, las islas Salomón y las Filipinas, no acabe perjudicando a la población que depende de los recursos marinos como fuente de alimentación y empleo. Durante años, los conservacionistas crearon áreas protegidas sin preocuparse mucho por las consecuencias para los lugareños. La creación de nuevas reservas marinas de gran tamaño en Raja Ampat y la adyacente península de Doberai constituye un experimento clave. Al sentirse involucrada, la población local está apoyando las restricciones en esas zonas. Sin embargo, las medidas también han creado fricciones entre quienes viven en ellas y los forasteros que hasta hace poco las explotaban comercialmente.

El experimento reviste importancia porque los estados signatarios del Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica (1992) acordaron proteger el diez por ciento de los océanos en 2020, lo que podría afectar a numerosas comunidades pesqueras. El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), en colaboración con la Universidad estatal de Papúa, analizará, como mínimo hasta 2014 y tal vez durante un plazo aún mayor, el impacto de las reservas marinas de la península de Doberai sobre la salud, el bienestar económico, la educación y la cultura de la población local. Según, Michael B. Mascia, director de investigaciones sociales del WWF, cabe preguntarse si las reservas marinas favorecen a los peces antes que a los pescadores que dependen de ellos. Esa cuestión genera conflictos en todo el mundo, pero escasean las investigaciones rigurosas sobre el tema.

La bibliografía y los documentos publicados por las organizaciones conservacionistas consideran los beneficios sociales de las reservas marinas una consecuencia inevitable. Sin embargo, si los efectos sobre la población local resultaran negativos o si esta se negara a aceptar las restricciones impuestas, harían falta métodos alternativos para preservar la salud de los océanos y el suministro de productos pesqueros. Los resultados de la península de Doberai son aún incipientes, pero algunas anécdotas proporcionan valiosas enseñanzas. Además, este gran experimento señala el nacimiento de una nueva era para la conservación del medio marino.

EN SÍNTESIS

La popularidad de las reservas marinas, donde se limitan actividades como la pesca, está aumentado, pues parecen proteger la biodiversidad y las pesquerías. No obstante, apenas se han investigado los efectos de las reservas sobre las comunidades locales.

Con el fin de responder a esa pregunta, en la actualidad se está realizando un extenso trabajo en Raja Ampat, una vasta región de Indonesia con centenares de islas, arrecifes de coral y manglares.

De momento, se han obtenido dos resultados claros: las reservas pequeñas ofrecen más ventajas a los pescadores locales porque son más fáciles de vigilar, con lo que pueden prosperar y ser gestionadas de forma sostenible. Asimismo, para que las reservas tengan éxito, la población debe diseñar las normas y vigilar su cumplimiento; en caso contrario, los propios habitantes pueden boicotear las medidas y tal vez surjan tensiones con foráneos.

PÁGINAS ANTERIORES: DAVID DOUBILET

DE CALADEROS A CAMPOS DE BATALLA

A finales de los años noventa del siglo xx, cuando Mascia era estudiante de posgrado en la Universidad de Duke, la conservación del medio terrestre se hallaba a años luz de la del medio marino. Por ejemplo, Costa Rica había destinado el 26 por ciento de sus tierras para espacios protegidos, pero menos del 1 por ciento de sus aguas territoriales. Mascia, titulado en biología y en políticas ambientales, creía en la necesidad de dedicar una mayor superficie marina en todo el planeta para conservar la biodiversidad y evitar el colapso de las pesquerías de las que dependen mil millones de personas como fuente de proteínas. Pero no quería ver cómo los conservacionistas y los gobiernos cometían los mismos errores que en tierra: expulsar a la población local de las zonas protegidas o impedirles el acceso a sus recursos naturales. Estas medidas, adoptadas desde arriba, a menudo habían dañado a las comunidades más pobres del mundo. La opción alternativa, que defendía que los habitantes debían gestionar sus propios recursos, estaba siendo pregonada como una nueva estrategia y había tenido éxito en la explotación maderera en la India y en los derechos de agua en Sudamérica. Las prácticas sostenibles estaban empezando a situar a las personas en primer lugar.

Trasladar el éxito al mar requería algo más que agua. Los bosques pueden delimitarse y monitorizarse fácilmente, pero los peces de importancia económica, como los atunes y los jureles, vagan sobre extensiones enormes. Y los pescadores aislados, a bordo de canoas excavadas en troncos, a menudo carecen de recursos para no verse apabullados por forasteros equipados con barcos más potentes y sistemas de pesca sofisticados.

Las reservas marinas difieren en sus tácticas, pero generalmente restringen el acceso de la población y zonifican las actividades humanas; prohíben la pesca en ciertas zonas y vetan por completo el acceso a otras. Como apunta Mascia, la ordenación tiene que ver con quién puede hacer qué, cómo, dónde y cuándo. Pero las reservas también difieren en quién pone las reglas, quién las hace cumplir y quién se beneficia de ellas. Esa variabilidad hizo darse cuenta a Mascia de que los efectos sobre las comunidades debían estudiarse con mayor detalle y halló en Raja Ampat el lugar donde buscar las respuestas.

A finales de los años noventa, Mascia había evaluado 42 reservas marinas en el Caribe. Observó que solo un tercio de ellas permitía la pesca de subsistencia y que la población local rara vez intervenía en su gestión. En un estudio reciente a escala global demostró que, tras la creación de las reservas, el suministro de alimento tendía a estabilizarse o a aumentar, lo que parecía una buena señal. Sin embargo, un análisis más detallado le permitió descubrir que, en una misma comunidad, algunos grupos de pescadores perdían el acceso a los recursos y otros lo ganaban. La mejora en el suministro de alimento observada resultaba engañosa; se debía a la concentración de los derechos de pesca en un grupo de pescadores dominantes a quienes después se preguntó cómo les habían afectado las medidas.

Mientras Mascia obtenía esos resultados desalentadores, le empezaban a llegar noticias sobre problemas en Raja Ampat, un punto caliente de biodiversidad con un número extraordinario de especies: 1320 de peces y 540 de corales (el 70 por ciento de las especies de coral del mundo). No existía ninguna reserva marina. La región se situaba en la provincia de Papúa Occidental, rica en recursos naturales. Un polvorín político con tribus indígenas y un movimiento separatista incipiente vigilado de cerca por el ejército indonesio.

Al mismo tiempo, Mark Erdmann, de Conservación Internacional, había observado serias amenazas para las pesquerías del archipiélago causadas por pescadores foráneos. Los pobladores originarios de las costas de Raja Ampat, de 4000 a 5000 personas conocidas como los Ma'ya, fueron temidos cazadores de cabezas en el pasado, pero ahora luchaban por conservar su modesta forma de vida. Habían respetado la tierra y las pesquerías y habían implantado vedas estacionales, o *sasi*, para gestionarlas. Sin embargo, la presión demográfica causada por el desplazamiento de las tribus del interior hacia la costa y la llegada de forasteros mejor equipados habían convertido la pesca en un juego donde el ganador se lo llevaba todo.

Los pescadores de Sulawesi, en particular, se habían hecho populares por sus sistemas de captura destructivos. A veces, contrataban a la población local para realizar el trabajo sucio y más peligroso. Otras veces lo hacían ellos mismos, con el apoyo de la policía y el ejército. Envenenaban con cianuro los arrecifes para atontar a los meros y peces Napoleón, de crecimiento lento y destinados al mercado de peces vivos de Hong Kong. Para capturar a los rápidos caesiónidos, arrojaban al agua dinamita o explosivos confeccionados con fertilizantes, con total impunidad.

Y por último, de su mano llegaron los arrastreros. «En los buenos tiempos, podíamos capturar carángidos tan anchos como nuestros cuerpos», comenta Trofinus Dailom, un líder espiritual de 57 años



Raja Ampat («cuatro reyes») está formado por cientos de islas en el extremo de la península de Doberai, en el noroeste de Papúa Occidental. En la zona ya existían tres reservas marinas (*rojo claro*). En el archipiélago se está realizando un experimento poco común para evaluar si los jefes locales pueden gestionar otras cuatro reservas (*negrita*) que aporten ventajas a la población.

MICHAEL NEWHOUSE (*mapa*)



Punto caliente: **Raja Ampat, que alberga el 70 por ciento de las especies de corales del mundo, podría convertirse en un destino privilegiado para el buceo y dejar de soportar la pesca ilegal.**

REINHARD DIRSCHERL, GETTY IMAGES

de edad del poblado de Kalitoko que ha participado en una misión de vigilancia en la bahía. Desde la llegada de los arrastreros, en los años noventa, esos peces se han vuelto escasos.

Las aguas de Raja Ampat se han convertido en un campo de batalla y los jefes locales no están dispuestos a doblegarse.

EXPERIMENTOS EN EL MAR

En 2004, Erdmann, un estadounidense que había estado viviendo de modo intermitente en Indonesia durante 20 años, tuvo un encuentro con las comunidades de la bahía de Mayalibit, la región donde vive Dortheus, para discutir el modo de recuperar el control sobre los recursos pesqueros. Él podía proporcionarles consejos, formación y dinero para crear una reserva marina, pero ellos debían hacerse cargo de la gestión. En diciembre de 2006, los jefes tradicionales de Raja Ampat declararon su intención de crear cuatro reservas marinas con la ayuda de grupos conservacionistas. Un vecino, Bram Goram, asumió la responsabilidad de gestionar la reserva de la bahía de Mayalibit. Bram aprovechó el conocimiento que tenía de la zona para ampliar el sistema de *sasi*. Su pueblo consideraba los cementerios y algunas formaciones naturales como zonas prohibidas, en señal de respeto a los ancestros y porque creían que entrar en dichas zonas, llamadas *mon*, podía acarrearles enfermedades o mala suerte. Bram creó el concepto híbrido de *sasimon* para introducir entre sus vecinos la idea de zonas vedadas a la pesca. Y estableció un equipo encargado de patrullar las aguas y disuadir a los infractores.

No obstante, dos años más tarde la población local aún carecía de autoridad jurídica para evitar que los forasteros utilizaran sus caladeros. La situación cambió en marzo de 2009, cuando los habitantes demostraron la voluntad de luchar por sus recursos. Un pesquero comercial anclado en el límite de la bahía, asistido por una flotilla de botes menores, estaba barriendo toda la zona. Cuando la patrulla de vigilancia de Bram se les encaró, los forasteros le enseñaron un permiso concedido por la oficina regional de pesca. Bram enfureció y exigió al Gobierno la revocación de la licencia. Sorprendentemente, el Gobierno accedió y además estableció una moratoria sobre todos los permisos de pesca en Mayalibit en posesión de no residentes. La comunidad tenía por fin el poder que necesitaba para proteger sus pesquerías, comenta Bram orgulloso. Hoy, la pesca está vedada en el 29 por ciento de la bahía, lo que incluye el 40 por ciento de los manglares y arrecifes. Las otras reservas de Doberai han desarrollado sus propias normas y se hallan en diferentes fases de implementación.

Para Mascia, los rápidos cambios en Raja Ampat representaban una excelente oportunidad para evaluar el impacto de las reservas marinas en los humanos. Pensó que un experimento en marcha sobre conservación resultaría también de utilidad para las ciencias sociales. Los sociólogos habían realizado algunos estudios a pequeña escala en comunidades pesqueras, pero Mascia quería seguir los pasos de un ambicioso proyecto desarrollado en tierra firme. Arun Agrawal, de la Universidad de Michigan, había analizado una red de 9000 parcelas forestales en 16 países y descubrió que responsabilizar a la población de la gestión de sus bosques aceleraba la regeneración. Ese hallazgo sugería que la patrulla de Bram podía ayudar a la recuperación de las poblaciones de peces. En 2009, Mascia y su colaboradora Helen Fox, también del WWF, se reunieron con Agrawal con el fin de impulsar un programa de supervisión en el Triángulo de Coral.

A finales de 2010, el equipo de Mascia inició un primer muestreo en 2433 hogares y 102 pueblos situados dentro y fuera de Mayalibit, la bahía de Cenderawasih y otras cuatro reservas marinas de la región. Preguntaron a los entrevistados, por ejemplo, con qué frecuencia vendían pescado o, en un intento de conocer su situación económica, si poseían un reproductor de DVD o un generador. Los datos del primer año indicaron que en el 12 por ciento de los hogares de Mayalibit se pasaba hambre de forma habitual, comparado con el 21 por ciento de los hogares de Cenderawasih, donde los habitantes solían alimentarse de fuentes de proteína distintas del pescado. Las diferencias en la dependencia relativa de cada comunidad con respecto a los recursos marinos influirá en el éxito de las reservas marinas, aunque resulta difícil predecir cómo. Cabe pensar que los habitantes con una mayor dependencia se verán más inclinados a defenderlos frente a los forasteros, pero al mismo tiempo tenderán a sobreexplotarlos. El equipo de Mascia ha finalizado las encuestas en Mayalibit y Cenderawasih, y está esperando la

evaluación de los datos para ver si se ha producido algún cambio tras dos años más de restricciones.

Debido a que cada área protegida cuenta con su propia mezcla de recursos, valores culturales y grado de implicación de grupos de conservación internacionales, los resultados más relevantes de las encuestas harán referencia a las ventajas que aportan las reservas, como la disponibilidad de alimento o la mejora de la situación económica. La comparación de los muestreos de 2010 y 2012 permitirá responder preguntas complejas, como si los beneficios se extienden también a los granjeros de las zonas costeras. El equipo necesita estudiar todas las reservas marinas antes de extraer conclusiones generales. Por ejemplo, la bahía de Mayalibit se halla rodeada por tierra, lo que facilita su protección frente a los forasteros. Otras reservas se sitúan en mar abierto, con solo unas cuantas islas diseminadas en su interior, circunstancia que dificulta la vigilancia y tal vez conlleve menos beneficios para sus habitantes.

Mascia también espera crear un amplio registro acerca del saber tradicional y los sistemas de pesca de Raja Ampat y la zona de Doberai. Ello le permitirá averiguar hasta qué punto el marco legal de la reserva encajará, o entrará en contradicción, con el liderazgo local. Ese conocimiento ayudará a las comunidades y a los responsables políticos a mejorar la gestión de los recursos, y Mascia podrá extraer conclusiones sobre quién está sacando provecho de las distintas reservas creadas. Los grupos conservacionistas esperan ansiosos los resultados; en 2011, la Sociedad para la Biología de la Conservación otorgó a Mascia el galardón *Conservacionista novel* por el «desarrollo, movilización y aplicación del conocimiento en ciencias sociales».

EL ÉXITO LOCAL ES UN ÉXITO GLOBAL

Comprender el impacto social de las reservas marinas resulta fundamental, si se tiene en cuenta su número creciente. En la actualidad existen unas 6000 en todo el mundo. Desde la creación en 2006, por el entonces presidente George W. Bush, de la mayor reserva marina del mundo en el noroeste de las islas Hawái, los conservacionistas han promovido reservas cada vez mayores, lo que inquieta a Mascia. En 2010, el Reino Unido superó el récord de las islas Hawái al cerrar a la pesca 545.000 kilómetros cuadrados en el archipiélago de Chagos, en el océano Índico. Los habitantes originarios de Chagos, obligados a abandonar su tierra en 1967 y que desde entonces han estado luchando para regresar, no fueron consultados sobre tal decisión. Para Mascia, el proceso para establecer una reserva no debía haberse iniciado sin antes haber resuelto el grave conflicto social.

La creación de enormes reservas marinas en áreas remotas ofrece a los Estados una vistosa oportunidad para cumplir con sus obligaciones relativas al Convenio sobre la Biodiversidad Biológica, pero su éxito resulta limitado. Las reservas de tamaño reducido tienden a favorecer a los pescadores de subsistencia, que pueden defender sus derechos sobre los recursos, lo que confiere al área protegida una mayor viabilidad a largo plazo. Sin embargo, la pesca industrial frente a las costas de Massachusetts o Alaska plantea retos muy diferentes. Pero la lección que emerge de Raja Ampat es que el diálogo entre pescadores, conservacionistas y reguladores facilita la creación de reservas marinas, lo que constituye una bendición para la biodiversidad.

¿Ofrece también la biodiversidad ventajas a las personas? Los datos iniciales sugieren que la conservación de la bahía de Mayalibit mejora la vida de las comunidades pesqueras. Los residentes solían pescar de forma intensiva en las proximidades de los poblados, lo que originaba un agotamiento de las aguas cada vez mayor. La creación de una pequeña zona protegida justo enfrente de los poblados ha cambiado la situación. «En solo dos años hemos vuelto a ver numerosos peces de gran tamaño frente al muelle», afirma Bram, el gestor de la reserva. Los peces que han podido refugiarse frente al poblado se han multiplicado y se han expandido a los caladeros próximos. La decisión tuvo éxito porque se adoptó un papel proactivo en la gestión de los recursos y en la educación de la población local.

Una mañana neblinosa presencié cómo un flaco lugareño a bordo de una canoa cargada con plátanos llamaba a Bram para explicarle que había visto a un grupo de forasteros sospechosos en una cala recóndita. El hombre sugirió que se creara allí una nueva zona cerrada a la pesca y añadió que le gustaría que se instalara un puesto avanzado de vigilancia en la cala.

«Es una de las medidas que deseamos impulsar», le confirmó Bram. «Gracias», replicó el hombre. «Siempre hay gente deseosa de echar a perder todo lo que hemos ganado.»

En conjunto, la creación de tres de las reservas de Raja Ampat (Kofiau, Misool y Dampier) ha reducido de forma modesta la captura por parte de pescadores foráneos: del 99 al 90 por ciento, según Crissy Huffard, de Conservación Internacional. En la bahía de Mayalibit los pescadores locales realizan el 60 por ciento de las capturas, en comparación con el 14 por ciento fuera de la reserva, y la patrulla de vigilancia ha prendido a más pescadores furtivos que en cualquier otra reserva.

Aunque los conservacionistas desearían que la investigación demostrara que los esfuerzos están restaurando la vida marina y favoreciendo a las comunidades locales, de momento carecen de pruebas sólidas. Temen que un cambio de circunstancias, como una nueva situación política, termine con los progresos logrados. Sin duda a los forasteros les disgusta la mayor vigilancia en Raja Ampat, y la población local que vive fuera de los límites de la reserva se lamenta de haber quedado al margen. Un acontecimiento preocupante constatado durante mi visita fue que la policía había dejado de apoyar a las patrullas de vigilancia después de que, a finales del año pasado, un agente disparara y matara accidentalmente a un furtivo que utilizaba dinamita.

La financiación también representa un problema. Raja Ampat recibe, y en la actualidad necesita, ayuda de organizaciones filantrópicas. El objetivo es la autosuficiencia de las reservas marinas gracias a los fondos procedentes del buceo recreativo en sus aguas. Resulta demasiado pronto para decir si la relación entre la población local y el Gobierno subsistirá sin la mediación y vigilancia de los grupos conservacionistas internacionales.

¿Y qué sucederá si el estudio de Mascia demuestra que las reservas marinas no ayudan a los pescadores de la región? «Nuestro objetivo es que tengan la información necesaria y conozcan los beneficios y los costes, de modo que puedan decidir con conocimiento de causa», afirma Erdmann. «Es lo mejor que podemos hacer. Al fin y al cabo, se trata de su tierra y recursos naturales, no de los nuestros.»

PARA SABER MÁS

El hombre en los programas de conservación. Peter Kareiva y Michelle Marvier en *Investigación y Ciencia*, n.º 375, págs. 12-20, diciembre de 2007.

Forest commons and local enforcement. Ashwini Chhatre y Arun Agrawal en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 36, págs. 13.286-13.291, septiembre de 2008.

Conservation refugees: The hundred-year conflict between global conservation and native peoples. Mark Dowie. MIT Press, 2009.

Impacts of marine protected areas on fishing communities. Michael B. Mascia et al. en *Conservation Biology*, vol. 24, n.º 5, págs. 1424-1429, octubre de 2010.

PALEONTOLOGÍA

EL APAREAMIENTO DE LOS DINOSAURIOS

Se ha empezado a resolver el indescifrable misterio de la copulación en los enormes reptiles

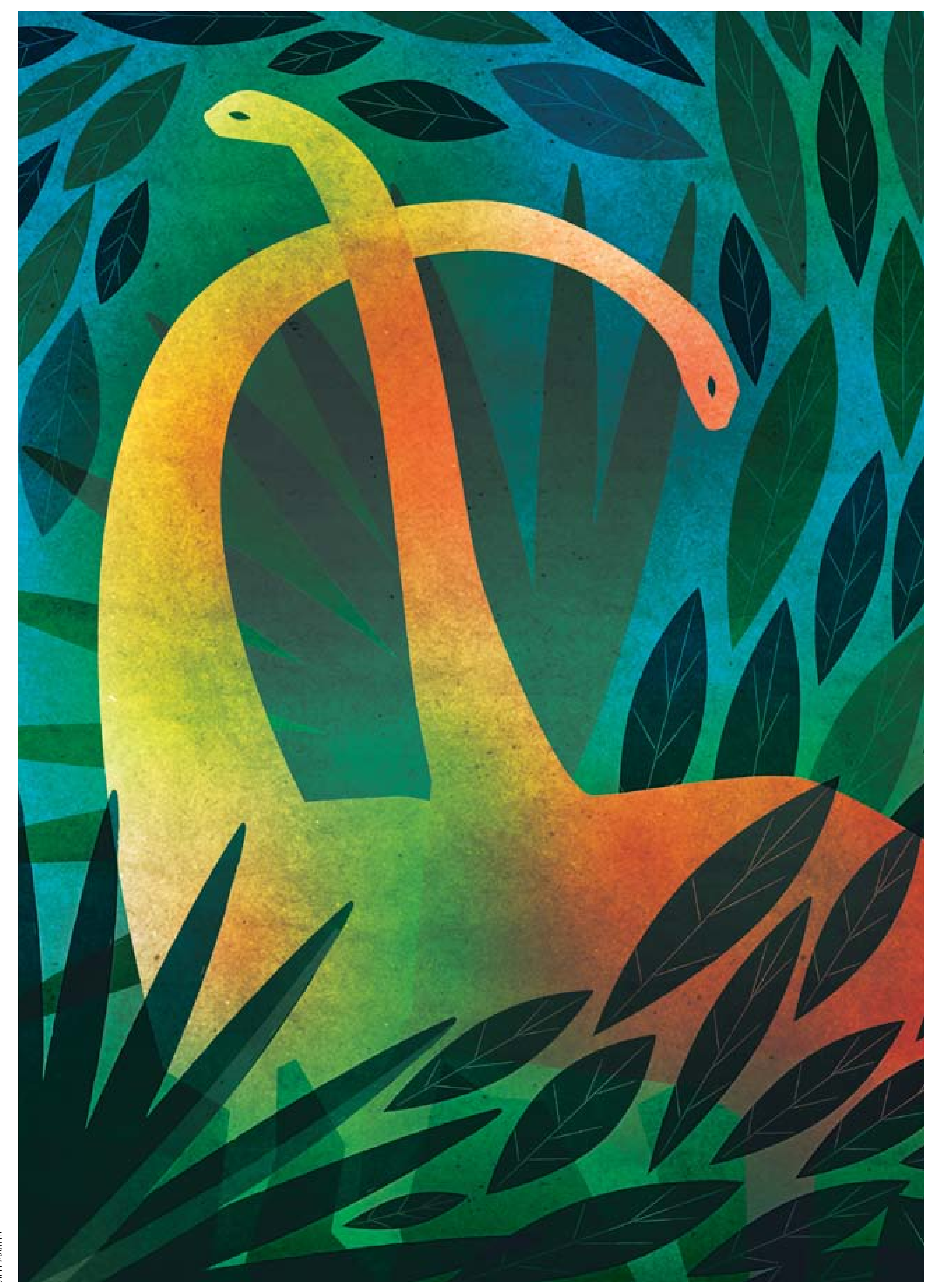
Brian Switek

Deambulaba por el Aeropuerto Internacional O'Hare de Chicago cuando lo vi: el esqueleto imponente y magnífico de un dinosaurio. Al principio pensé que se trataba de una alucinación creada por mi mente ofuscada a causa del viaje. Pero, al ir aproximándome, comprobé que la imagen no desaparecía. Las extremidades anteriores, semejantes a columnas, y los robustos omóplatos soportaban una larga serie de huesos del cuello que terminaba en un pequeño cráneo con forma de caja. Era como si el animal intentara mirar, más allá, las llegadas y salidas que se producían en la pista de aterrizaje. Me detuve y me quedé observando el gigante, una réplica de un *Brachiosaurus* donada por el Museo Field de Chicago. Mentalmente, fui situando en el esqueleto los órganos internos, musculatura y piel de este dinosaurio de más de 28 metros de longitud, uno de los más grandes que se conocen. Entonces, se me ocurrió una extraña pregunta: ¿cómo podían copular esos animales gigantescos?

Aturdido y cansado me imaginé una pareja de *Brachiosaurus* en un claro de bosque de coníferas hace 150 millones de años, durante el período Jurásico, contemplándose y esperando a que el otro hiciera el primer movimiento. ¿Montaría el macho a la hembra por detrás? ¿Podría soportar esta su peso? ¿Qué haría la hembra con su enorme cola? Mi vuelo empezó a embarcar, así que tuve que despedirme del esqueleto, pero en el avión continué reflexionando sobre el misterio de su apareamiento. Desde entonces ese tema no ha dejado de fascinarme.

Los dinosaurios necesitarían copular para reproducirse. De forma similar a como lo hacen los reptiles actuales, los machos depositarían esperma en el interior de las hembras y, más tarde, estas pondrían huevos con embriones de dinosaurio en desarrollo. Aunque se han deducido numerosos aspectos de la biología de los dinosaurios, se desconocen los mecanismos de su apareamiento. En parte porque estudiar el comportamiento sexual de los animales era históricamente un tabú, y parecía quedar tan fuera del alcance de la ciencia, que poco se podía decir con alguna base. Pero no todas las esperanzas están

Adaptado de My beloved Brontosaurus: On the road with old bones, new science, and our favorite dinosaurs*, por Brian Switek, con el acuerdo de Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, LLC.*



AMY MARTIN

perdidas. Los fósiles de dinosaurios han proporcionado algunas pistas sobre el momento en que alcanzaban la madurez sexual y el modo en que atraían a su pareja. A su vez, los estudios sobre aves y cocodrilos, los animales vivos más estrechamente emparentados con los dinosaurios, nos dan una idea de cómo podía ser su anatomía reproductora externa. Los modelos digitales nos ofrecen la posibilidad de verificar hipótesis sobre la forma en que esos gigantes copulaban. Quedan numerosos detalles por descubrir, pero poco a poco se está empezando a desvelar el enigma de la actividad sexual en los dinosaurios.

Brian Switek es escritor científico especializado en evolución, paleontología e historia natural. *My beloved Brontosaurus* es su segundo libro.



CERRADO Y BAJO LLAVE

En el registro fósil resulta difícil hallar indicios sobre la conducta sexual de cualquier especie. Como ejemplos excepcionales, cabe mencionar los fósiles de 47 millones de años de antigüedad pertenecientes a dos tortugas que murieron mientras copulaban, o los de una pareja de tiburones de hace 320 millones de años que quedaron enterrados durante el cortejo. Por desgracia, no se han encontrado esqueletos de dinosaurios que quedaran atrapados durante el acto sexual. Ni siquiera los ejemplares mejor conservados presentan vestigios de los órganos reproductores.

Para estudiar los órganos de esos animales extintos, los científicos deben examinar sus parientes vivos más próximos, las aves y los cocodrilos. Las primeras representan dinosaurios vivientes, un linaje especializado que surgió hace 150 millones de años y que hoy continúa prosperando. El grupo de los cocodrilos, que incluye a aligatores, gaviales, caimanes y cocodrilos, son los reptiles vivos más cercanos al grupo formado por los dinosaurios extintos y las aves. Un rasgo presente en los pájaros y cocodrilos actuales seguramente también existiría en los dinosaurios no avianos. Un ejemplo es la cloaca, el orificio común del aparato reproductor, urinario y digestivo que poseen machos y hembras de aves y cocodrilos y que, por extensión, tal vez también tendrían los dinosaurios. Así, los genitales de un *Apatosaurus* no resultarían visibles, sino que estarían confinados en la cloaca, la cual aparecería como una rendija por debajo del inicio de la cola.

La mayoría de las aves carecen de pene en la cloaca; para fecundar con su semen a la hembra, unen los orificios en lo que se denomina «beso cloacal». Pero los machos de algunas especies sí presentan el órgano y, de forma interesante, sus líneas evolutivas surgen cerca del origen de la familia de las aves. Según Patricia Brennan, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y sus colaboradores, ello significa que las aves arcaicas poseían pene pero los grupos posteriores habrían perdido ese rasgo durante la evolución. Igual que las aves acuáticas y otros linajes arcaicos de aves, los machos de cocodrilo utilizan también un pene para inseminar a las hembras de modo semejante. Cabe pensar, por tanto, que los dinosaurios también lo tendrían. Y partiendo de las características de los genitales de los pájaros y cocodrilos, podemos inferir que el falo de los dinosaurios constituía un órgano simple con un canal largo por el que fluía el semen durante la copulación. Aun así, teniendo en cuenta que vivieron unos 1850 géneros de dinosaurios hace entre 245 y 66 millones de años, sin duda habría numerosas variaciones respecto a ese esquema.

¿MACHO O HEMBRA?

Para reconstruir los hábitos de apareamiento no basta con conocer los órganos reproductores. Se necesita diferenciar a los machos de las hembras, una tarea difícil en ausencia de genitales. Durante largo tiempo se han buscado características en el esqueleto que permitieran identificar el sexo. Pero la mayoría de los rasgos que se han propuesto, como la cresta que ostentarían en la cabeza los machos de *Lambeosaurus*, no han resultado unos buenos indicadores.

Debido a la dificultad o imposibilidad de observar diferencias esqueléticas entre machos y hembras de dinosaurios, la única forma de averiguar su sexo consiste en descubrir un indicio más directo. Hallar huevos creciendo en el interior de un esqueleto, como los descubiertos en un fósil de ovirraptor en China, representa una manera de reconocer una hembra. Pero hay más opciones. En 2000, un fósil de *Tyrannosaurus rex* ofreció una solución para identificar el sexo femenino. En algunas especies de aves, cuando esta se halla formando huevos, desarrolla una fina capa de tejido de hueso medular en el interior de las diáfisis de los huesos largos de sus extremidades. Ese tejido es muy rico en calcio y actúa como una reserva de materia prima para construir las cáscaras. Mary H. Schweitzer, de la Universidad estatal de Carolina del Norte, examinó un fémur roto de *T. rex* y halló en él hueso medular. El fósil pudo pertenecer a una hembra que pereció cuando estaba preñada. Ese descubrimiento no solo significaba que los dinosaurios tenían la misma respuesta fisiológica que sus descendientes, las aves, sino que reveló una forma de identificar las hembras, al menos las gestantes.

Basándose en los resultados de Schweitzer, Andrew Lee, actualmente en la Universidad del Medio Oeste, y Sarah Werning, de la Universidad de California en Berkeley, investigaron la edad a la que los dinosaurios alcanzaban la madurez sexual. Algunos estudios anteriores habían demostrado que sus huesos exhibían anillos que podían utilizarse para calcular la edad de fallecimiento. Esas líneas de crecimiento (*lines of arrested growth*) corresponden a períodos anuales de desarrollo lento a causa de condiciones ambientales desfavorables, como las estaciones de sequía, cuando el agua y la comida escasean. Las líneas y la reconstrucción de las curvas de crecimiento de los dinosaurios indican que muchos de

EN SÍNTESIS

Los científicos han esquivado estudiar la copulación en los dinosaurios en parte por pudor y también por la ausencia de pruebas.

Pero las investigaciones sobre los parientes vivos más próximos a los dinosaurios están proporcionando detalles acerca de su anatomía reproductora.

Las simulaciones por ordenador permiten comprobar la verosimilitud de las posibles posturas de apareamiento.

ellos experimentaban un desarrollo rápido durante los primeros años de vida y, conforme se acercaban a la edad adulta, este se ralentizaba.

Al estudiar las líneas de crecimiento en la hembra de *T. rex* gestante y en otros dos dinosaurios con trazas de hueso medular (un herbívoro con pico denominado *Tenontosaurus* y el carnívoro *Allosaurus*), Lee y Werning determinaron que se trataba de individuos jóvenes. *Tenontosaurus* murió hacia los ocho años de edad, *Allosaurus* hacia los diez y *Tyrannosaurus* a los dieciocho. Todavía estaban creciendo, ya que sus esqueletos no habían alcanzado la madurez. Además, el hueso medular solo indicaba la edad en que las hembras habían quedado preñadas por última vez.

Los dinosaurios tenían una vida corta y perecían jóvenes. Para Lee y Werning, el crecimiento rápido y la reproducción temprana darían fe de una vida llena de peligros y dificultades en la que convenía un apareamiento prematuro para poder pasar los genes a la siguiente generación. Criar pronto debería revestir aún mayor importancia en los dinosaurios de mayores dimensiones. Si un gigante de 20 metros, como *Apatosaurus*, hubiese tardado décadas en alcanzar la madurez sexual, muy pocos de ellos habrían llegado a la edad adulta para reproducirse. Por el contrario, Lee y Werning calculan que esos dinosaurios empezarían a reproducirse mucho antes de alcanzar su tamaño definitivo, hacia los 19 años de edad.

HIPÓTESIS REVOLUCIONARIAS

Sin embargo, antes de aparearse los dinosaurios debían atraer a su pareja. Los paleontólogos se han preguntado durante mucho tiempo si los extravagantes adornos de los dinosaurios, como crestas, espinas, placas, cuernos y plumas, servían para seducir a otros de su especie. Los cuellos largos de los saurópodos tal vez desempeñaran una función similar. Aunque esos extraordinarios cuellos seguramente evolucionaron para que los animales pudieran acceder a un abanico más amplio de alimentos, también habrían desempeñado una función en el apareamiento. Quizá presentaran colores y diseños llamativos que advirtiesen de su buen estado de salud a sus posibles parejas. De hecho, la mayoría de los saurópodos poseían tal tamaño que no se hallaban amenazados por ningún depredador, por lo que podían prescindir del camuflaje y exhibir colores chillones. Otros dinosaurios también se lucirían ante los demás. Al dinosaurio espinoso *Kentrosaurus* deberían de parecerle atractivas las placas y pinchos del sexo opuesto, mientras que las hembras del saurópodo *Amargasaurus* quizás escogerían a los machos con las espinas del cuello más largas. Sin embargo, a pesar de su atractivo, esos rasgos singulares sin duda complicarían el apareamiento. Lo que nos conduce de nuevo a la pregunta que me planteé al contemplar el *Brachiosaurus* del aeropuerto O'Hare. Después de todas las exhibiciones y el cortejo, ¿cómo copulaban los dinosaurios? Las explicaciones que se han propuesto se basan en gran medida en las capacidades físicas que se atribuyen a los dinosaurios.

El experto en biomecánica R. McNeill Alexander, de la Universidad de Leeds, piensa que los dinosaurios se apareaban de la misma forma en que lo hacen los elefantes y rinocerontes actuales, en los que las hembras cargan con el peso de los machos. La diferencia principal estriba en que los dinosaurios poseían una cola enorme y rígida. Partiendo de la idea de que los machos colocaban una de sus patas delanteras sobre la espalda de las hembras, Alexander apunta que el peso del macho debía ser soportado por los cuartos traseros de la hembra. Representaría un peso enorme, pero, como señala el investigador, las presiones resultantes no superarían las que se producían al caminar, ya que, al dar cada paso, el peso del dinosaurio debía ser soportado por una sola pata mientras que la otra avanzaba por el aire. «Si los dinosaurios tenían la fuerza que les permitía caminar, también la tendrían para poder copular», escribió Alexander en 1991.

El paleontólogo británico Beverly Halstead también opina que los dinosaurios macho debían montar a las hembras para inseminarlas. Pero en vez de compararlos con los elefantes o rinocerontes, piensa que se comportaban de forma similar a los aligatores o a los lagartos actuales. Supone que los machos colocarían una pierna en la espalda de su pareja y ese movimiento haría que su pelvis se situase bajo la cola de la hembra, momento en que unirían las cloacas. Las especies con colas muy largas pudieron haber entrelazado sus rabos para lograr una mayor estimulación, tal y como hacen las serpientes actuales cuando enroscan sus cuerpos.

Personalmente, nunca me he sentido satisfecho con esa explicación estereotipada sobre la copulación de los dinosaurios. Por un lado, se desconoce si las piernas o la cola de los saurópodos podían flexionarse de forma que pudieran conseguir esa posición. Además, los carnívoros bípedos como *Allosaurus* necesitarían una gran capacidad de equilibrio y de cooperación como para poder aparearse de tal forma. Sobre el papel resulta fácil imaginar a dinosaurios flexibles, pero nadie ha contrastado esas ideas mediante el examen de los huesos ni ha evaluado la verosimilitud de esas posturas. ¿Se acostaban de lado las hembras durante la cópula? ¿O se acostaban juntos macho y hembra? A los investigadores no les faltan ideas, pero no van mucho más allá que realizar meros dibujos para reconstruirlas.

> Los rasgos y adornos extravagantes complicarían sin duda el acto sexual

Los blindados y espinosos estegosaurios formaron quizá las parejas más extrañas. Tomemos el ejemplo de *Kentrosaurus*, pariente del famoso *Stegosaurus*. Este dinosaurio acorazado lucía unas espinas gigantes sobre su lomo y sus caderas que resultarían peligrosas para los machos. Pedí a mi amigo paleontólogo Heinrich Mallison, del Museo de Historia Natural de Berlín, que evaluase la posibilidad de que *Kentrosaurus* hubiese copulado con la postura de la pierna sobre la espalda y que utilizase los modelos digitales que él había desarrollado para estudiar la flexibilidad de esos animales. Mallison examinó las diferentes posiciones de los dinosaurios de forma tridimensional y concluyó que la forma de apareamiento tradicional atribuida a los dinosaurios resultaba imposible en *Kentrosaurus*. Si un macho hubiese intentado colocar una pata sobre una hembra agachada se habría castrado a sí mismo con las afiladas espinas de su pareja. En particular, una espina de la cadera parecía estar colocada ex profeso para atemorizar a los pretendientes estegosaurios. El dinosaurio debió de aparearse de otra forma, quizá con la hembra acostada de lado y el macho alzando su torso por encima de sus cuartos traseros. Sin duda, otras especies emplearían posturas diferentes y quizá los estudios futuros nos permitan conocerlas. La aplicación de nuevas técnicas para examinar los fósiles ayudará a entender el modo en que proliferaron los dinosaurios durante su extraordinario reinado.

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburgo-Essen.

Mecánica celeste con rozamiento

En un futuro lejano, la Tierra y la Luna describirán una rotación síncrona y ambas se darán continuamente la misma cara

En 1754, cuando la Real Academia Prusiana de las Ciencias planteó a la comunidad científica si el sistema solar sufriría cambios a largo plazo, puso en duda la visión del mundo imperante en aquella época. La respuesta correcta llegó de un joven físico que, años más tarde, alcanzaría fama universal como autoridad filosófica sobre las concepciones del mundo: Immanuel Kant.

Hasta mediados del siglo XVIII, el universo se concebía como un gran reloj que repetía una y otra vez los mismos movimientos con una precisión extrema. No en vano, resulta posible calcular eclipses solares y lunares hacia delante y hacia atrás en el tiempo a lo largo de miles de años. Ello resulta posible porque, en el movimiento entre dos cuerpos celestes, el rozamiento no desempeña ningún papel.

Sin embargo, como bien señalara Kant, la fricción sí afecta a la dinámica interna de los astros. Dado que la atracción gravitatoria decrece con la distancia, la Luna ejerce un arrastre ligeramente mayor sobre la cara de la Tierra que se halla enfrentada al satélite. Tales fuerzas, denominadas fuerzas de marea, provocan una pequeña elevación de los continentes y del fondo marino y, como es bien sabido, incrementan también el nivel del mar en algunos decímetros.

Lo mismo ocurre en la cara de nuestro planeta opuesta a la Luna. Allí la atracción gravitatoria del satélite no basta para forzar a la materia a describir una órbita circular exacta en torno al centro de gravedad del sistema Tierra-Luna. Y aunque el campo gravitatorio de la Tierra y las tensiones elásticas de sus componentes sólidos impiden que esas zonas escapen volando tangencialmente, no evitan que su superficie se eleve unos pocos decímetros. Algunos textos hacen responsable de este efecto a la fuerza centrífuga, si bien ello resulta solo formalmente cierto, en el mejor de los casos, en un sistema de referencia que rota a la par de la Tierra.

Los materiales sólidos y líquidos de la Tierra oponen una fuerza de rozamiento a la deformación causada por las fuerzas de marea. Ello provoca también un ligero calentamiento, lo que acaba disipando parte de la energía del movimiento orbital de la Tierra y la Luna. El momento angular, sin embargo, se conserva. Como resultado de estas interacciones, los astros acaban intercambiando una fracción de su energía y de su momento angular. A primera vista, sin embargo, el resultado parece paradójico: como consecuencia de la energía cinética que la Tierra cede a la Luna, no solo se ralentiza la rotación de la primera, sino también la traslación de la segunda.

Movimientos rotacionales

Partamos de la suposición simplificada, aunque no demasiado alejada de la realidad, de que la Tierra y la Luna describen sendas órbitas circulares en torno a su centro de masas común. Puede resultar de ayuda separar mentalmente el movimiento de cada astro en dos: una rotación propia (con respecto al «resto

CONCEPCIONES DEL MUNDO

En 1754, la Real Academia Prusiana de las Ciencias planteó a la comunidad científica una pregunta que atañía a un aspecto fundamental de la concepción del mundo imperante en la época: ¿experimentaría el sistema solar cambios en el futuro? He aquí parte de la respuesta que propuso un joven Immanuel Kant:

[...] Es cierto que, cuando se compara la lentitud de este movimiento con la rapidez de la Tierra, el menosprecio de la parte acuosa con la grandeza de esta esfera, y la ligereza de la primera con la gravedad de la última, parecería que su influencia podría considerarse nula. Si, por el contrario, tenemos en cuenta que este impulso es constante, que perdura desde siempre y que por siempre se mantendrá, que la rotación de la Tierra es un movimiento libre, del cual la mínima cantidad que se le arrebata se pierde sin sustitución y, por otro lado, la causa que hace disminuir sin descanso ese movimiento se mantiene con la misma viveza, para un filósofo sería un prejuicio impropio declarar como nula la influencia de algo mínimo que, sumándose constantemente, puede, sin embargo, suponer la mayor de las cantidades.



DOMINIO PÚBLICO




La forma de embudo del canal de la Mancha amplifica los efectos de las mareas. El monte Saint-Michel, cerca de la costa de Normandía, se convierte dos veces al día en una isla.

del mundo») y una traslación circular sin rotación. Cabe comparar esta última con el movimiento circular de nuestra mano cuando limpiamos una mesa y los dedos apuntan siempre en la misma dirección: cada punto de la mano describe un círculo de igual diámetro, pero en torno a un centro diferente. Si la Tierra y la Luna orbitasen de ese modo, actuaría una aceleración centrípeta uniforme sobre todos los puntos de la Luna, así como sobre todos los de la Tierra. Sin embargo, no ocurre así. Y a ello precisamente debemos las mareas.

En nuestros días, la Luna rota sobre su propio eje con la misma velocidad angular con la que gira alrededor de la Tierra; es decir, el período orbital (sideral) de la Luna y la Tierra en torno al centro de masas común coincide con el período de rotación de la Luna sobre su propio eje. El satélite nos muestra siempre su misma cara. Por esta razón, las fuerzas de marea que actúan sobre la Luna lo hacen siempre con la misma intensidad en los mismos sitios. Como resultado, el astro rota como un sólido rígido que no experimenta rozamiento interno.

Lo anterior no resulta del todo cierto, ya que, desde la Tierra, la Luna parece experimentar ligeros movimientos oscilatorios, conocidos como libraciones. Estas nos permiten ver hasta un 59 por ciento de la superficie lunar. Aparte de ese 9 por ciento, el aspecto de la cara oculta de la Luna se desconocía por completo hasta que la sonda soviética *Luna 3* la fotografió por primera vez.

Esa similitud entre la duración del período orbital y rotacional de nuestro satélite podría obedecer a una simple coincidencia astronómica, como ocurre con el hecho de que el Sol y la Luna tengan el mismo diámetro aparente vistos desde la Tierra. Sin embargo, el acoplamiento de la rotación de la Luna a su órbita resulta más bien obligado. Y lo que ya ha acontecido a la Luna nos muestra lo que le espera a la Tierra, aunque para ello debamos esperar algunos miles de millones de años.

Sin mar y sin GPS no notaríamos las fuerzas de marea. Sin embargo, en los estuarios de los grandes ríos podemos observar diferencias de varios metros entre la bajamar y la pleamar. Cada 25 horas aproximadamente, la superficie experimenta dos bajamares y dos pleamares. Ese lapso de tiempo puede calcularse con exactitud a partir de las dos velocidades angulares implicadas: un día sideral (es decir, una rotación terrestre no con respecto al Sol, sino con respecto a las estrellas) dura 86.164 segundos, y un mes sideral (el período orbital de la Luna alrededor de la Tierra), 27,32 días.

Además de la Luna, también el Sol provoca mareas sobre la Tierra, aunque solo la mitad de intensas. La atracción que el astro rey ejerce sobre nuestro planeta resulta mucho mayor que la que ejerce la Luna, pero su variación entre las caras diurna y nocturna apenas resulta perceptible, debido a la gran distancia que lo separa de nosotros. Cuando el Sol, la Tierra y la Luna se encuentran sobre el mismo eje, el efecto de las mareas se amplifica (marea viva); si la estrella se halla en ángulo recto con respecto a la Luna, la bajamar provocada por el Sol debilita la pleamar causada por nuestro satélite natural (marea muerta). Cuando una marea viva se ve acompañada por el mal tiempo pueden acontecer inundaciones catastróficas, como las que anegaron el delta del Rin en 1953.

También el Sol ejerce fuerzas de marea sobre la Luna, si bien estas resultan mucho más débiles que las provocadas por la Tierra. Por tanto, y dado que la Luna solo puede sincronizarse con uno de los dos astros causantes de sus mareas, lo hace con la Tierra. El efecto del Sol se limita a agitar (y con ello a calentar) ligeramente nuestro satélite, pero sin llegar a bloquear su rotación.

Cantidades conservadas

Al igual que la energía, el momento angular constituye también una cantidad conservada. Pero, a diferencia de la primera, este no se transforma en calor. Cuando, por efecto de las mareas, disminuye la velocidad de rotación de la Tierra, esta pierde momento angular. Y, dado que las mareas son causadas por la Luna, no resulta muy difícil concluir que es nuestro satélite quien recibe dicho momento angular, así como parte de la energía que cede la Tierra.

Hagamos primero una aclaración sobre las relaciones de posesión de tales magnitudes conservadas. Cuando una manzana cae de un árbol, nuestros manuales escolares hablan de «su» energía potencial, la cual se transformará en energía cinética

Así se movería nuestro planeta, sin rotación propia, alrededor del centro de masas de la Tierra y la Luna. Todos los puntos de la Tierra describen círculos de igual diámetro con la misma aceleración centrípeta.

a medida que caiga. Por el contrario, en el caso de la energía almacenada en la cuerda de un arco en tensión, no solemos describirla como la «energía potencial de la flecha», por más que después esta sí sea considerada como poseedora de energía cinética. En todo caso, según esta forma de hablar, diríamos que lo que sucede es que la Luna gana energía potencial.

Lo que ocurre también puede describirse como sigue. Parte de la energía de rotación perdida por la Tierra permanece en nuestro planeta en forma de calor; el resto va a parar al campo gravitatorio entre la Tierra y la Luna. El momento angular que pierde la Tierra permanece en el sistema Tierra-Luna. Pero este no puede limitarse a acelerar la órbita del satélite, ya que ello violaría la tercera ley de Kepler, la cual dicta que el cociente entre el cuadrado del período orbital del satélite y el cubo de su distancia a la Tierra debe permanecer constante. La distancia entre ambos cuerpos ha de aumentar, por lo que, para que se cumpla la tercera ley de Kepler, debe tener lugar una disminución de las velocidades orbital y angular de ambos astros. Así, para absorber el momento angular de la rotación terrestre, la Luna se ve obligada a ceder energía cinética. Todas estas pérdidas energéticas (con excepción del calor disipado por el rozamiento) van a parar al campo gravitatorio entre la Tierra y la Luna.

Por otro lado, la rotación de la Luna se ajusta a esa desaceleración de su velocidad orbital, de modo que ambas continúan acopladas. La causa no es otra que el minúsculo rozamiento que provocan las fuerzas de marea en el interior del satélite.

Tres centímetros al año

Echando mano de la tercera ley de Kepler podremos predecir el futuro lejano del sistema Tierra-Luna sin más ayuda que un papel y un lápiz. Dado que la órbita lunar se asemeja bastante a una circunferencia, podemos considerar que la Tierra y la Luna corresponden a dos cuerpos de masas M y m que describen sendas órbitas circulares en torno a su centro de masas común. Sus radios orbitales respectivos, r y R, satisfacen $r/R = m/M$. La distancia entre sus centros viene dada por $R + r$. Si G denota la constante de la gravitación universal, la fuerza que media entre ambos cuerpos asciende a $GMm/(R + r)^2$, la cual actúa como fuerza centrípeta para ambos astros. Su velocidad angular puede escribirse como $\Omega = 2\pi/T$, donde T representa el período orbital. Según la tercera ley de Kepler, T y R satisfacen la siguiente relación:

$$R^3/T^2 = GM\big((M + m)/M\big)^2/(4\pi^2)\,.$$

(En los manuales al uso solemos encontrar el caso límite en el que $m \ll M$.)

Si tomamos los datos tabulados de las masas de la Tierra y la Luna, así como los de sus períodos orbitales (siderales), podremos recuperar los valores del radio orbital de la Luna, $R = 3{,}80 \cdot 10^8$ metros, y la distancia entre sus centros, $R + r = 3{,}84 \cdot 10^8$ metros.

Gracias a las mediciones por interferometría láser, sabemos que la Luna se aleja de nosotros a razón de unos 3 centímetros al año. Podemos escribir el aumento relativo del radio orbital lunar como:

$$x = dR/R = 3 \text{ cm}/(3{,}80 \cdot 10^8 \text{ m}) = 7{,}89 \cdot 10^{-11},$$

lo cual nos permitirá calcular en qué medida se ajustan las otras magnitudes.

A partir de ahora aproximaremos las cantidades pertinentes mediante una fórmula que se halla en la frontera con el cálculo diferencial. Puesto que x es mucho menor que 1, en todo desarrollo de potencias de $(1 + x)$ podremos desestimar todas las potencias de x excepto la primera. Por ejemplo:

$$(1 + x)^2 \approx 1 + 2x\,,$$

lo que implica que la superficie de un cuadrado aumenta aproximadamente en un 2 por ciento cuando los lados se alargan un 1 por ciento. Del mismo modo, hallaremos que $1/(1 + x)$ puede aproximarse por $(1 - x)$; es decir, que el inverso de una cantidad se reduce en aproximadamente un 1 por ciento cuando el valor de esta aumenta en un 1 por ciento.

Ahora podemos aplicar la tercera ley de Kepler al movimiento de la Luna con radios orbitales R y $R + dR$ y los períodos orbitales correspondientes, T y $T + dT$. A partir de:

$$\big((R + dR)/R\big)^3 = \big((T + dT)/T\big)^2,$$

obtenemos que, si $dR \ll R$ y $dT \ll T$, la relación se simplifica y se convierte en $dT/T = (3/2)dR/R$. Por tanto, si el radio orbital aumenta en un 1 por ciento, el pe-

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN NORBERT TREIZ; NASA (*luna*)

ríodo orbital lo hará en un 1,5 por ciento. A partir del valor de x calculado arriba, podemos concluir que el período orbital sideral de la Luna (27,32 días) se alarga cada año en 28 milisegundos.

¿Cómo se modifica entonces su velocidad lineal? Dado que la circunferencia aumenta según la relación $(1 + x)$ y el período orbital crece como $(1 + 3x/2)$, vemos que la velocidad de nuestro satélite (del orden de un kilómetro por segundo) disminuirá de acuerdo con la expresión $(1 - x/2)$. La energía cinética es proporcional a la velocidad al cuadrado, por lo que tenemos que esta decrece como $(1 - x)$. Por tanto, de unos $3{,}7 \cdot 10^{28}$ julios, se perderán cada año en torno a $2{,}9 \cdot 10^{18}$ julios. Ello se corresponde con la cantidad de energía que la Tierra cede cada año al campo gravitatorio; la misma que se invierte en alejar 3 centímetros la posición de la Luna.

Como no podemos determinar con facilidad la cantidad de energía perdida por rozamiento, procederemos con el cálculo del momento angular de la Luna. Podemos limitarnos al momento angular orbital L, ya que la parte debida a la rotación resulta insignificante. A partir de la expresión:

$$L = mRv = 2\pi mR^2/T\,,$$

obtenemos que L aumenta en razón de:

$$(1 + 2x)(1 - 3x/2) \approx (1 + x/2)\,.$$

Es decir, aumenta en $x/2$ veces su valor, lo que equivale a unos $1{,}04 \cdot 10^{24}$ J · s al año. Esta cifra coincide con la cantidad de momento angular que pierde la rotación de la Tierra.

A continuación necesitamos conocer el momento de inercia I de nuestro planeta. Para una esfera homogénea de radio a, este viene dado por $I = (2/5)Ma^2$. Sin embargo, el interior de la Tierra presenta una densidad notablemente mayor que las regiones más externas, lo que resulta en un factor de corrección de 0,8. Ello nos da un momento de inercia igual a $7{,}8 \cdot 10^{37}$ kg · m².

Si un cuerpo con ese momento de inercia pierde al año $1{,}04 \cdot 10^{24}$ J · s de momento angular, su velocidad angular se reducirá en $1{,}33 \cdot 10^{-14}$ radianes por segundo. Ya que su valor actual asciende a unos $2\pi/86.164$ radianes por segundo, la disminución relativa anual equivale a $1{,}82 \cdot 10^{-10}$. Ese dato coincide con el aumento relativo en la duración del día sideral, que vemos por tanto que se incrementará en unos 16 microsegundos al año.

¿Cuánto durará un segundo?

El factor $1{,}82 \cdot 10^{-10}$ resulta notablemente mayor que el incremento relativo en la duración de la órbita lunar: $0{,}17 \cdot 10^{-10}$. Si los días siderales continúan tornándose más y más largos, lo mismo ocurrirá con los días solares, ya que el período orbital de la Tierra es extremadamente estable.

Hasta mediados del siglo XX, el segundo se definía como la fracción 1/86.400 del día solar medio. Si decidiésemos emplear dichas unidades para determinar la longitud de los meses lunares —cada vez más largos—, nos sucedería lo mismo que a quien intenta documentar el crecimiento de un niño tallando muescas en un árbol. Si este crece más rápido que el pequeño, podría llegar a la conclusión de que el niño mengua. Aquí, aunque los meses aumentan su duración temporal, los días y los segundos lo hacen con mayor rapidez, por lo que si los meses se midiesen en tales unidades, se acortarían.

Por supuesto, nuestros cálculos solo revisten validez en la actual época cósmica. Dentro de miles de millones de años, el proceso habrá alcanzado un equilibrio y el día y el mes durarán lo mismo. Para calcularlo, debemos tener en cuenta que el momento angular total, $L = 3{,}48 \cdot 10^{34}$ J · s, se conserva. En esencia, este consta de la rotación terrestre y del momento angular orbital de la Luna. Si suponemos que al estado final solo contribuye la órbita lunar, obtenemos que:

$$L = 2\pi mR_\infty^2/T_\infty\,,$$

donde el subíndice ∞ denota los valores finales (de equilibrio) que alcanzará de cada cantidad. Si en la expresión anterior despejamos T_∞ y lo introducimos en la tercera ley de Kepler, llegaremos a la expresión:

$$R_\infty = L^2/(GMm^2) = 5{,}5 \cdot 10^8 \text{ m}\,,$$

donde aquí sí hemos considerado que $M \gg m$. Este resultado asciende a unas 1,4 veces el radio actual de la órbita lunar. La duración del mes será entonces unas $(1{,}4)^{3/2}$ veces mayor; esto es, el equivalente a unos 46 días actuales y el mismo tiempo que la Tierra tardará en completar una vuelta sobre su eje. La Luna se situará siempre sobre el mismo lugar de nuestro planeta, y será invisible para quienes vivan en el lado contrario. El día solar durará cerca de 53 días actuales, un dato que puede deducirse a partir de la diferencia entre las velocidades angulares del movimiento de rotación y de traslación terrestres.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es investigador de filosofía en la Universidad de California del Sur.



Dilemas cooperativos e inducción hacia atrás

¿Qué ocurre al iterar múltiples veces el dilema del prisionero?

Uno de los problemas más conocidos en teoría de juegos es el dilema del prisionero. En él, se llega a la inquietante conclusión de que dos individuos que actúan de manera completamente racional deben acabar tomando decisiones que perjudican no solo a su «competidor», sino también a ellos mismos.

En el dilema clásico dos individuos deben decidir si cooperan o no. Y si bien a ambos les convendría cooperar, lo más racional desde el punto de vista de cada uno es no hacerlo. También plantea la pregunta de por qué a menudo sí se observan comportamientos cooperativos en situaciones similares. En esta columna veremos una versión menos conocida del problema que, aunque parece apuntar una solución, nos lleva a una paradoja similar.

El dilema clásico

Andrés y Bernardo han sido detenidos, acusados de haber atracado una joyería. Aunque la policía no puede demostrar su culpabilidad, posee pruebas de que han estado vendiendo joyas robadas. Andrés y Bernardo saben esto.

Los agentes los conducen a calabozos separados y proponen a cada uno de ellos el siguiente trato: si uno confiesa y el otro no, el delator quedará libre y el cómplice será encarcelado 10 meses; si ambos confiesan, recibirán sendas penas de 5 meses; y si los dos callan, ambos permanecerán en prisión 1 mes. Andrés y Bernardo saben que a ninguno de ellos le preocupa el bienestar del otro, por lo que son conscientes de que cada uno tomará la decisión que minimice su propia pena. Saben también que, suceda lo que suceda, nunca más volverán a verse.

Andrés considera sus opciones: «Si Bernardo confiesa, me conviene delatarlo, ya que así recibiré 5 meses de prisión en lugar de 10. Y si Bernardo calla, también me interesa confesar, ya que entonces quedaré libre, en vez de ir 1 mes a prisión». La situación es simétrica, por lo que Bernardo llega a la misma conclusión. De modo que, al final, ambos son condenados a 5 meses de cárcel. Sin embargo, a los dos les habría ido mucho mejor si hubiesen permanecido en silencio, ya que en tal caso solo habrían sido condenados a 1 mes de prisión.

Si bien este ejemplo resulta un poco artificial, en el mundo real ocurren situaciones similares con cierta frecuencia. Supongamos que en un pueblo hay dos farmacias que se dividen el mercado a partes iguales. En cierto momento, ambas deben decidir de manera independiente si ofertan un descuento del 25 por ciento o no. Si solo una de ellas lo hace, aumentará su control del mercado y, con ello, sus ganancias totales. Pero si las dos farmacias rebajan sus precios un 25 por ciento, ninguna incrementará su volumen de ventas y ambas verán disminuidos sus beneficios.

A pesar de ello, desde el punto de vista de cada farmacia lo más conveniente es ofrecer siempre el descuento. Si una de ellas rebaja sus precios y la otra no, esta última se arriesgará a perder un gran número de clientes. Y si la primera no hace nada, la segunda podría lograr grandes beneficios con la oferta. Por tanto, al final ambas harán la rebaja, ninguna aumentará su cuota de mercado y las dos sufrirán pérdidas del 25 por ciento.

Dilemas múltiples

A Andrés le conviene confesar porque su decisión no afectará a la que tome Bernardo. Andrés puede razonar que, haga lo que haga, Bernardo habrá tomado una decisión u otra. Y cualquiera que sea esta, a él le conviene más confesar que quedarse callado.

Pero imaginemos que Andrés y Bernardo deben enfrentarse a la misma situación numerosas veces. Han sido acusados de veinte crímenes similares y, por cada uno de ellos, la policía les ofrece el mismo trato. Tras cada decisión, cada uno es informado de la resolución que acaba de tomar su compañero. ¿Afectaría ello a sus decisiones futuras?

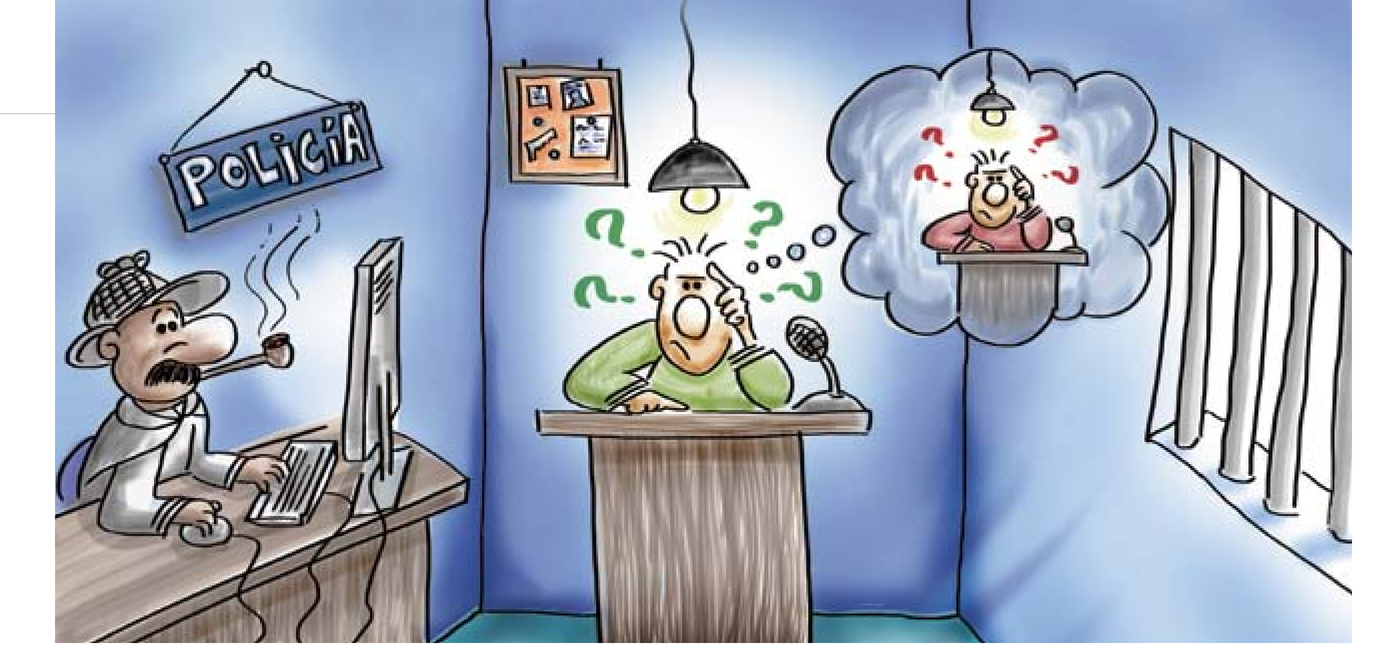
Si Andrés opta por permanecer en silencio, tal vez aumente la probabilidad de que Bernardo calle en el futuro. Desde el punto de vista de Andrés, no confesar es una manera de comunicarse con Bernardo y sugerirle que colabore; un modo de establecer una reputación de alguien que no delata a su cómplice a menos que este lo traicione. Ello podría contribuir a que Bernardo decida no confesar y a que los dos cooperen, lo que resultaría en un desenlace ventajoso para ambos.

Imaginemos que en la primera ronda Andrés permanece en silencio y Bernardo confiesa. La condena de Andrés subirá a 10 meses, mientras que la de Bernardo se quedará en 0. Si en el siguiente turno ambos callan, Andrés recibirá un total de 11 meses de cárcel y Bernardo, solo 1. Bernardo puede pensar que, al no confesar, incentiva a Andrés a permanecer callado en el futuro, en cuyo caso solo serán condenados a 29 y 19 meses en la cárcel, respectivamente. Por el contrario, si Bernardo confiesa en la segunda ronda, podría empujar a Andrés a delatarlo en la tercera y sucesivas, con lo que recibirían penas de 110 y 90 meses.

La observación anterior parece razonable. De hecho, nos permitiría empezar a entender cómo puede surgir la cooperación entre individuos que solo buscan su propio interés. El problema reside en que hay un argumento que nos lleva a concluir que cada uno de ellos debería confesar las veinte veces seguidas.

Del futuro al presente

Al saber que va a enfrentarse a una decisión similar veinte veces, Andrés siente la



Investigación y Ciencia, según María Eugenia Carballo

tentación de cooperar. Sin embargo, tras reflexionar un poco, concluye lo siguiente: «¿Qué sucederá en la última ronda? Bernardo sabrá entonces que no tiene nada que ganar si calla. La decisión que él tome no afectará a mis decisiones futuras, pues no habrá decisiones futuras. De modo que, con independencia de lo que yo decida en la ronda número 20, a Bernardo le convendrá confesar en esa ronda. Es más, sin importar lo que yo decida en el turno número 19, a Bernardo le convendrá delatarme en la ronda número 20. Así pues, ¿qué me incentiva a callar en la ronda 19?».

«Ahora bien», continúa Andrés, «Bernardo se percatará de ello —lo conozco y es tan listo como yo—, de modo que no tendrá ningún motivo para permanecer en silencio en la ronda 18. Él sabrá que, con independencia de lo que él haga, confesaré en la ronda 19. El mismo razonamiento es válido para los turnos 17, 16, etcétera. Por tanto, ambos deberemos confesar todos los crímenes. Una lástima, porque ello nos acarreará 100 meses de cárcel, en lugar de los 20 que obtendríamos si ambos callásemos todo el tiempo».

He aquí el dilema. Si bien parece razonable que Andrés y Bernardo puedan llegar a un acuerdo para permanecer en silencio la mayor parte de las ocasiones, el razonamiento inductivo del párrafo anterior nos lleva a concluir que eso no es posible. En términos más precisos, lo que sucede es que, si ambos son racionales (y si saben que son racionales, y si saben que saben que son racionales, etcétera) deberán confesar todas y cada una de las veces. ¿Puede ser que nos hallemos ante una situación en la que a ambos les convendría actuar de modo irracional? [*Véase* «El problema de Newcomb», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, septiembre de 2008.]

Llegados a este punto, nos gustaría destacar dos problemas que involucran un razonamiento similar.

Paradojas de la inducción hacia atrás

El examen sorpresa: El uno de enero, la profesora de un curso de lógica anuncia a sus alumnos lo siguiente: «Este mes voy a hacerles un examen sorpresa».

Antes de que la clase continúe, Olivia levanta la mano: «Disculpe, profesora, pero algo así no es posible. En primer lugar, sabemos que el examen no podrá tener lugar el último día del mes: si llegado el día 30 no hemos realizado ninguna prueba, sabremos que usted la convocará al día siguiente, por lo que no sería ninguna sorpresa. De modo que, a lo más tardar, deberemos hacer el examen el día 30. Pero entonces podemos inferir que este tampoco tendrá lugar el día 30, ya que si al final del día 29 no hemos hecho ningún examen, sabremos que deberá usted convocarlo el día 30... por lo que tampoco sería una sorpresa. Iterando este razonamiento para los días 29, 28, etcétera, podemos concluir que es imposible que nos haga usted un examen sorpresa este mes».

Ahora bien, todos sabemos que es posible hacer un examen sorpresa, por lo que debe de existir algún fallo en el razonamiento de Olivia. Sin embargo, detectarlo resulta bastante más difícil de lo que parece. Nótese que, por el momento, tanto aquí como en la versión iterada del dilema del prisionero hemos empleado una argumentación muy similar.

La caja de monedas de oro: Clara y Diana se encuentran frente a una caja con 50 monedas de oro. Las reglas del juego son muy sencillas. Por turnos, cada una debe decidir si toma una o dos monedas. El juego terminará cuando una de ellas extraiga dos monedas a la vez; en ese momento, cada una marchará a casa con las monedas que haya tomado hasta entonces.

Supongamos que le toca empezar a Clara. ¿Qué debería hacer? Usando la inducción hacia atrás, Clara puede concluir que, ya en el primer turno, debería extraer dos monedas y poner fin al juego.

Clara llega a esa conclusión por medio del siguiente razonamiento: «Supongamos que jugamos hasta que solo queden dos monedas. Puesto que habrá transcurrido un número par de turnos, en ese momento me tocará a mí. Pero entonces me convendrá extraer las dos monedas de oro restantes, ya que de esa manera obtendré un total de 26 monedas, en lugar de 25. Sin embargo, Diana llegará a la misma conclusión en la ronda anterior. Con solo tres monedas en la caja, yo tendría 24 monedas y Diana, solo 23. Por tanto, si toma dos monedas, irá a casa con 25 monedas de oro, en lugar de las 24 que obtendrá si solo extrajese una y me permitiese a mí quedarme con las dos últimas. Lo mismo sucederá en cada ronda. Por tanto, lo que más me conviene es tomar dos monedas en el primer turno y poner fin al juego».

Si solo hubieran podido garantizar un acuerdo, ¡Clara se habría ido a casa con 23 euros más!

Invitamos al lector a considerar si la conclusión de cada uno de los dos problemas que acabamos de esbozar le parece más o menos creíble que la del dilema del prisionero múltiple. Las posibles soluciones las discutiremos en el número de agosto.

PARA SABER MÁS

La evolución de la cooperación: El dilema del prisionero y la teoría de juegos. Robert Axelrod. Alianza Editorial, 1996.

Un ejemplo del dilema del prisionero que fue resuelto de manera espectacular tuvo lugar en el concurso de la BBC *Golden Balls*. Les recomiendo que le echen un vistazo en YouTube: **youtu.be/S0qjK3TWZE8**



MANUAL DE MICROSCOPIA

Por Bruno P. Kremer, traducido por Joan Farré. Editorial Omega; Barcelona, 2012.

Técnicas ópticas y tintoriales

La importancia de la metodología

Cuando me llegó el libro que lleva por título *Manual de microscopia*, lo abrí con gran atención. Una obra nueva siempre despierta interés, motivación, pero en este caso la curiosidad es superior a la habitual por dos cuestiones: primera, ¿qué puede aportar de nuevo esta obra? Disponemos de un número muy aceptable de manuales de microscopía óptica; muchos de ellos, de la mitad del siglo XX, ya se han convertido en clásicos. Algunos son guías-formulario que permiten preparar diversidad de reactivos específicos para visualizar y poder estudiar células y tejidos animales y vegetales. Han sido y continúan siendo textos de referencia, dado que múltiples métodos tintoriales que figuran en ellos son totalmente válidos en la actualidad. Entre otros textos citaremos el Romeis (1928), el Langeron (1949), el Gabe (1968), el Martoja-Martoja (1970), muchos de ellos publicados por la prestigiosa editorial francesa Masson.

Cabe señalar que la fecha de publicación de dichas obras es de entrada un obstáculo, por varias razones: hay quien considera que lo que contiene un texto de mediados del siglo pasado es obsoleto e inservible; además, algunas de estas obras son difíciles de encontrar, hay que saber buscarlas en los santuarios de las grandes obras.

Efectivamente, hay obras que fueron de referencia en su momento y que han quedado olvidadas a pesar de que su principal interés reside en su carácter casi enciclopédico. Ofrecen recetas y fórmulas para la preparación de muestras muy diversas; en general, materiales que están a nuestro alcance: pelos, plumas, sangre, granos de almidón y de polen de diversas especies, distintos tipos de madera, microorganismos acuáticos y terrestres, formas adultas y larvarias de especies terrestres y acuáticas, etcétera. Son como un «cajón de sastre», una fuente generosa de informaciones heterogéneas. En este sentido quiero recordar los dos volúmenes de E. Séguy, *Le microscope: Emploie et applications* (Paul Lechevalier, París 1951), y la *Microscopia analítica* de T. E. Wallis (Acribia de Zaragoza, 1967). Con el mismo enfoque de este texto, la editorial Omega publicó la traducción del alemán del magnífico libro de W. Nachtigall *Microscopia* (1997).

En la línea de este último se ha publicado la obra que aquí reseño, un *Manual de microscopia* de Bruno P. Kremer, también traducido del alemán por la misma editorial Omega. Se trata de una invitación tan sugerente que difícilmente puede uno resistirse a aplicar los métodos descritos para conseguir ver al microscopio lo que podemos contemplar en la abundante y magnífica iconografía que ilustra este texto. Imágenes en campo claro, contraste de fases, contraste interferencial, luz polarizada, realmente un despliegue técnico que pone de manifiesto que la microscopia óptica nunca será obsoleta. A la vez que demuestra la riqueza de recursos gráficos que se obtienen al aplicar las distintas técnicas tanto ópticas como tintoriales.

Material inorgánico diverso, magníficas cristalizaciones inorgánicas y orgánicas, cristales de hielo con sus múltiples formas dejan maravillado al lector. Aspectos microscópicos de diversos tipos de fibras naturales y artificiales que van desde el algodón al velero. Materiales que tienen en común que no requieren ser cortados para visualizarse, como son los granos de polen o los granos de almidón, se alternan con secciones finas obtenidas con los diversos tipos de micrótomos. Cortes vegetales magníficamente ilustrados con microfotografías y que en ocasiones van acompañadas por esquemas explicativos de alta calidad. Secciones longitudinales y transversales de los distintos órganos vegetativos y reproductores de fanerógamas diversas.

La segunda cuestión que alimenta mi curiosidad es la siguiente: ¿quien podrá ser el posible lector de dicha obra? No creo que el especialista en los nucleosomas, en los priones o en la telomerasa, el estudioso del genoma ni el biólogo celular sientan curiosidad por descubrir lo que encierra esta obra magníficamente presentada. Los profesores de disciplinas en las que el uso del microscopio es obligado, tanto en ciencias experimentales como en medicina o veterinaria, seguro que lo abrirán; algunos se prendarán de la obra, la hojearán con interés y, en muchos casos, se sentirán desgraciados por no poder llevar a la práctica muchas de las sugerencias que nos ofrece Kremer, no por ser complicadas, que no lo son, sino por falta de tiempo. Los actuales planes de estudio que siguen más o menos el de Bolonia han experimentado unos recortes considerables; asimismo, han disminuido las horas de clases magistrales y, más grave todavía, también las sesiones prácticas. Esta misma problemática se presenta en los niveles inferiores de enseñanza de nuestro país.

Lo que propone este *Manual de microscopia* debe llevarse a cabo en el laboratorio: preparar los reactivos (no todo son *kits* comercializados), aplicarlos sobre el material en estudio previamente condicionado para ello (fijación o no, microtomía por un sistema u otro) y, finalmente, observarlos al microscopio, escogiendo la más idónea de un abanico de posibilidades de observación. (El experimentador optará inicialmente por la recomendación del autor, pero a la vez se dejará guiar por su curiosidad y seguramente probará otras técnicas para verificar que la aconsejada es realmente la mejor.)

No resisto la tentación de escoger un párrafo de la memoria leída por Santiago Ramón y Cajal, con motivo de su ingreso a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid en 1897:

«Reglas y consejos sobre investigación científica», en que hace referencia a la metodología:

> *La maestría de los métodos, particularmente en las ciencias biológicas, es tan trascendental, que, sin temor de equivocación, se puede afirmar que los grandes descubrimientos corren a cargo de los técnicos más primorosos: de aquellos sabios que han profundizado, a favor de perseverantes ensayos, todos los secretos de uno o varios recursos analíticos.*

Me encanta Kremer, cuando en el último capítulo, titulado *Metodología y técnicas*, se atreve a afirmar «hoy en día el dibujo y la fotografía se complementan». Pocos son los profesores que insisten en ello y muchos los alumnos que, con el pretexto de no saber dibujar, se limitan a hacer, en el mejor de los casos, cuatro garabatos sin proporcionalidad (aunque ello no debe hacernos olvidar que todavía existen estudiantes selectos que se muestran atentos a lo que escuchan y ven, que son minuciosos en sus trabajos prácticos y capaces de elaborar memorias de prácticas que merecerían ser publicadas). Las cámaras digitales son difíciles de combatir; sin embargo, hay que intentarlo. La observación requiere tiempo, requiere tratar adecuadamente el microscopio, requiere paciencia.

En un último capítulo se ofrecen las fórmulas para preparar muchos de los reactivos mencionados en el texto. El nombre de algunos colorantes no tiene la traducción correcta al castellano, hecho que se habría podido subsanar si el traductor hubiese consultado algunos de los manuales anteriormente citados o a expertos en la materia.

Incluye también un apartado dedicado a las distintas modalidades de microscopia óptica existentes, acompañadas de imágenes realmente espectaculares. Algunas técnicas de cultivo de bacterias y mohos, muy ilustrativas y sencillas de llevar a cabo, dan paso a una excelente selección bibliográfica.

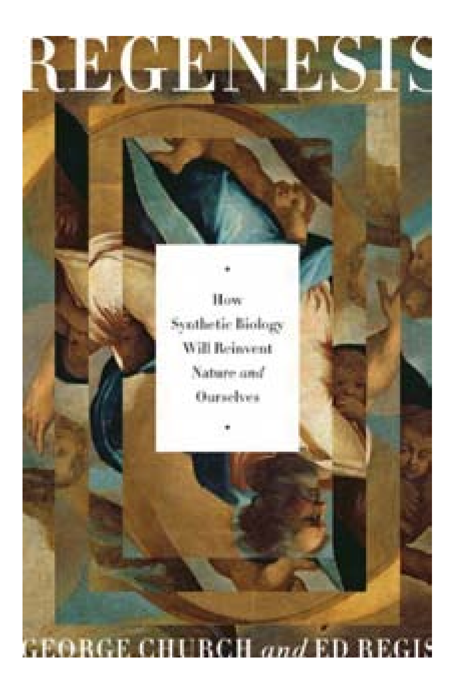
Por último, un detalle de gran utilidad que en un opúsculo que tuve ocasión de publicar hace ya muchos años incluí: una relación de casas comerciales donde se pueden adquirir los materiales y reactivos que han sido seleccionados en esta obra.

Deseo que esta valiosa joya editorial tenga la divulgación que se merece y abra el apetito y la curiosidad a cuantos lo hayan leído y visualizado, de la misma manera que me ha incitado a mí a seguir ciertas recomendaciones que desconocía, con un resultado sorprendentemente excelente.

Sin duda Kremer nos despertará el interés por todo lo que nos rodea y que, dado su tamaño, solo es posible apreciar mediante un buen uso del microscopio y, en muchas ocasiones, con una adecuada preparación de la muestra.

Una vez más, hay que dar la razón a Ramón y Cajal cuando afirma en su discurso anteriormente mencionado: «Lo más curioso es que el trabajo me causaba placer. Era una embriaguez deliciosa, un encanto irresistible». Visualizar por uno mismo las imágenes que nos ofrece el microscopio constituye realmente un espectáculo único.

—Mercè Durfort
Universidad de Barcelona



REGENESIS. HOW SYNTHETIC BIOLOGY WILL REINVENT NATURE AND OURSELVES

Por George Church y Ed Regis.
Basic Books; Nueva York, 2012.

Biología sintética

Nueva frontera de la investigación genómica

Imaginemos un futuro en el que el hombre haya adquirido inmunidad contra todos los virus, en el que las bacterias produzcan bienes de consumo, generen electricidad y suministren biocombustibles que nos permitan acabar con la dependencia del petróleo. Cuando construir una casa no suponga más esfuerzo que sembrar una semilla en el campo. ¿Fantasía? No así para la biología sintética, cuyos cultivadores se multiplican por días. A imagen de los computadores, capaces de simular, con una programación adecuada, la actividad de cualquier otro ingenio, los organismos podrían devenir constructores universales, en el sentido de que, debidamente programados en su genoma, podrían producir cualquier bien imaginable. Cierto es que los microorganismos no pueden convertir plomo en oro. Pero de momento sí pueden transformar residuos en electricidad.

La biología sintética trasciende la mera manipulación microbiana y pone en cuestión conceptos centrales de la evolución. Capaz de escoger trayectorias diferentes de las que originalmente tomó la naturaleza, la disciplina ha recorrido tres fases. La primera fue la era de la ingeniería genética o la biotecnología. Comenzó en los años setenta con la modificación del genoma de microorganismos. Se alteró el de *Escherichia coli* para que produjera insulina, eritropoyetina y anticuerpos monoclonales, entre otros. La segunda fase se aplicó a la elaboración y desarrollo de una genómica sintética asociada a la fabricación de nuevos fármacos y producción de biocombustibles y alimentos genéticamente modificados. En la tercera fase, la actual, se pretende la síntesis completa de genomas, la

creación incluso de especies enteramente nuevas.

Conocemos ya plásticos de origen vegetal. Por su estructura química, el Mirel es un polihidroxibutirato (PHB), que se venía extrayendo de hidrocarburos fósiles. El PHB de extracción microbiana presenta ventajas ambientales evidentes sobre la versión derivada del petróleo: libera nuestra dependencia de los combustibles fósiles; su fuente principal, el maíz, era un recurso renovable y sostenible, y, por fin, las resinas Mirel son los únicos bioplásticos sin almidón acreditados por organismos de certificación en cuanto a biodegradabilidad en suelos naturales y el mar. De compuestos petroquímicos se obtenía también el 1,3-propanediol (PDO), principal componente de la fibra Sorona para alfombras. Se creó una cepa industrial de *Escherichia coli*, con 26 cambios genéticos, que convertía directamente la glucosa del maíz en PDO en un tanque de fermentación, igual que la cerveza o el Mirel. Organismos genéticamente manipulados producen diésel, gasolina y combustible para aviones. Y se manipulan microorganismos para detectar la presencia de arsénico en el agua potable a unas concentraciones sumamente bajas (cinco partes por mil millones).

En el laboratorio del autor principal del libro, George Church, en la Universidad Harvard, se trabaja en una nueva técnica que, en línea de principio, podría devolver la vida a especies extinguidas cuyo genoma se conozca o pueda reconstruirse a partir de restos fósiles (como el mamut lanudo). Uno de los graves obstáculos para semejante proeza reside en la carencia de núcleos celulares intactos, lo que significa que no existe núcleo disponible para una clonación por transferencia nuclear. Aunque se haya reconstruido la secuencia genómica del mamut y esté registrada en bases de datos, no se sabe cómo convertir una secuencia abstracta de letras en hebras de nucleótidos que conformen el genoma. Confían, no obstante, en el refinamiento de la técnica MAGE (ingeniería del genoma múltiple automatizado), una suerte de versión acelerada y a escala industrial de la ingeniería genética. Sería también el golpe de gracia contra el vitalismo, sostiene Church.

Lo que nos lleva hasta Jöns Jacob Berzelius, autor de la primera separación tajante entre compuestos orgánicos, los derivados de la materia viva, e inorgánicos, el resto. (Introdujo también los términos de catálisis, polímero e isómero, entre otros.) La separación en cuestión facilitó la explicación de la vida. En esa distinción se apoyó el vitalismo, teoría según la cual la vida y sus procesos no son reducibles a las leyes de la física y la química. El vitalismo sufrió su primer embate en 1828, cuando Friedrich Wöhler declaró que podía, a partir de fuentes inorgánicas, sintetizar urea, un producto típico de los organismos vivos. Wöhler sintetizó urea a partir de cianato de amonio. El cianato se obtenía del cianuro, que en aquel tiempo se lograba a partir del ferrocianuro, extraído a su vez de los desechos de las fábricas de curtidos. En 1845, Hermann Kolbe mostró que el ácido acético, un producto final común en los organismos vivos, podía constituirse a partir de la síntesis de sus elementos. Pero el vitalismo recibió un sólido respaldo con el experimento de Pasteur, en 1859, que arruinaba la idea de generación espontánea. *Omne vivum ex vivo*, la irreductibilidad de la materia viva a algo no vivo, fue una de las convicciones más firmemente mantenidas por Pasteur. Sostiene Church que, contra la tesis vitalista, laboran los resultados obtenidos en cuatro áreas de investigación: síntesis de la urea, moléculas especulares, polímeros (proteínas, ADN y ARN, que presentan quiralidad) y autorreproducción molecular.

En 1969, K. W. Jeon, I. J. Lorch y J. F. Danielli, de la Universidad de Nueva York, decidieron crear una organismo sintético. Tras participar en un simposio sobre la síntesis experimental de células vivas, pensaron que poseían los medios para ensamblar *Amoeba proteus* a partir de sus componentes principales, vale decir, núcleo, citoplasma y membrana celular. Tomaron el núcleo de una ameba, el citoplasma de otra y los introdujeron en el interior evacuado de una membrana celular. Aunque el organismo sobrevivió el 85 por ciento del tiempo, no se trataba de una célula sintética, pues todos sus componentes eran naturales.

La ingeniería genética comenzó en 1972, cuando coincidieron Stanley Cohen y Herbert Boyer en Honolulu, en una conferencia sobre plásmidos, fragmentos circulares de ADN que pueden replicarse independientemente de los cromosomas celulares. En la conferencia, Cohen hizo público que podía insertar plásmidos en *E. coli*, para que la bacteria los propagara y clonara. Boyer habló de su trabajo con EcoRI, enzima que corta el ADN en puntos específicos. Ambos se percataron de que, si combinaban sus dos hallazgos, podrían ensartar fragmentos de dos plásmidos diferentes y producir ADN recombinante, dejando que la bacteria produjera cantidades ingentes del plásmido así creado.

El primer genoma sintético fue construido por Blight, Rice y otros en el año 2000. Sintetizaron el virus de la hepatitis C, que afecta a 170 millones de personas. Su genoma consta de unas 9600 bases. En 2002, Cello, Paul y Wimmer sintetizaron un segundo genoma, el del virus de la polio. Un año después, Hamilton Smith y su grupo sintetizaron un tercer genoma, el del virus phiX174, con el fin de mejorar la velocidad de ensamblaje del genoma a partir de oligonucleótidos. Recibió más atención, pese a que era un genoma menor (5386 bases) y no tenía impacto alguno sobre la salud. En 2008, se reconstruyó el agente causante del SARS (síndrome respiratorio agudo severo), un coronavirus. Pero las versiones sintéticas del SARS no funcionaron porque había errores; cuando se corrigieron estos, el genoma vírico sintético terminó por infectar a células en cultivo y a ratones.

Con todo, la caja de resonancia de la biología sintética fue la serie de experimentos realizados por Craig Venter en el Instituto J. Craig Venter, y otros, entre ellos Hamilton Smith. Ilustran hasta qué punto podemos modificar el genoma de determinados organismos. No solo modificarlo, sino mejorarlo y ensamblarlo. En 2005, se propusieron identificar los genes esenciales de una bacteria mínima. Advirtieron que, para su funcionamiento, la bacteria podría prescindir de numerosos genes; los había que incluso frenaban su desarrollo. Las bacterias más pequeñas, miembros del género *Mycoplasma*, no llegan a la micra de longitud. El volumen físico adquirido por una *Mycoplasma* es evidentemente la menor cantidad de espacio en el que pueden acomodarse todos los mecanismos moleculares necesarios para la vida.

En el laboratorio de Venter se trabajó con *Mycoplasma genitalium*, bacteria con un exiguo genoma de solo 582.970 pares de bases y 482 genes codificadores de proteínas. (El microorganismo debe su nombre a que constituye un patógeno del tracto urogenital humano.) Comenzaron por inactivar varios genes codificadores, uno por uno, y anotar el efecto ejercido. Observaron que un centenar de los genes codificadores de proteínas, en torno a un 20 por ciento del total, era «pres-

cindible». Apreciaron también que la interrupción de algunos genes aceleraba la tasa de desarrollo del microorganismo. Los restantes 382 genes codificadores de proteínas, tres genes transportadores de fosfato y 43 genes codificadores de ARN, constituyen presumiblemente el conjunto imprescindible para el desarrollo de esa célula mínima.

En 2007, el equipo de Venter sintetizó el genoma de *M. genitalium*. Lo denominaron *Mycoplasma genitalium* JCVI-1.0 La síntesis constituyó todo un hito técnico. Avanzando un paso más, en un nuevo experimento, cambiaron una especie bacteriana en otra. Tomaron el genoma de una especie y lo transfirieron a otra, para luego pasar de esta a la primera. Se sirvieron de un genoma natural (no sintético). Las especies en cuestión eran dos tipos de *Mycoplasma: M. mycoides* y *M. capricolum*, organismos experimentales más adecuados que *M. genitalium* debido a su mayor rapidez de crecimiento. Pese a su complicación técnica, desde el punto de vista conceptual se trataba de un procedimiento sencillo. Los investigadores transfirieron el genoma de *M. mycoides* a una cepa silvestre de *M. capricolum*. Durante un breve tiempo hubo dos genomas en una misma célula; mas no tardó el nuevo ADN en ser reconocido y asumido por la célula receptora, convirtiéndose así en una bacteria *M. mycoides*. «El cambio de *software* eliminaba por completo el viejo organismo y creaba uno nuevo», explicó Venter. El genoma invasor actuó como un virus, tomando el mando de la célula y transformándola.

Tras ello, vino el experimento culminante. Consistió en diseñar, digitalizar y luego ensamblar químicamente el genoma de *M. mycoides*, de 1,08 millones de pares de bases, e introducirlo en una célula. A ese genoma lo denominaron *M. mycoides* JVCI-syn 1.0. Repitieron lo realizado con el genoma natural de *M. mycoides* del primer experimento: trasplantarlo a una célula receptora de *M. capricolum*. Se obtuvieron idénticos resultados: el nuevo genoma, sintético, tomó el control de *M. capricolum* y la convirtió en *M. mycoides*.

Paralelamente, en 2006, Anthony Forster y Church se aprestaron a crear una célula mínima que fuera, además, un organismo vivo sustancialmente sintético. Su idea: fabricar, a partir de moléculas, un sistema químico capaz de replicación y evolución. En oposición a la biología reduccionista de Venter, procederían de abajo arriba, vale decir, montar un ser vivo a partir de sus componentes; primero, las moléculas se ensamblarían en subsistemas, que, a su vez, formarían unidades mayores, etcétera. Pergeñaron el genoma fijándose en los genes homólogos de genomas de diversos grupos de organismos. Parece racional pensar que los genes compartidos por especies diferentes son urgidos, necesarios. Esa idea, sumada a otros métodos tomados de la genética y la bioquímica, sugería un genoma que constaba solo de 151 genes y 113.000 pares de bases de largo.

Sintetizaron el genoma, en una esfera ceñida por una membrana de bicapa lipídica y rellena de enzimas macromoleculares codificadas por 151 genes y un inventario mínimo de pequeñas moléculas necesarias para la vida. Todo el sistema podría emerger a la vida mediante la adición de ribosomas sintéticos, factores de traducción y otras estructuras inspiradas en las células de *E. coli*. Con el tiempo, ese planteamiento habría de producir una célula mínima sintética, autorreplicante y autosuficiente. Para evitar que la célula se replique fuera de las paredes del laboratorio, introducen en su interior una dependencia de nutrientes que no se encuentran en ningún otro ámbito.

—*Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



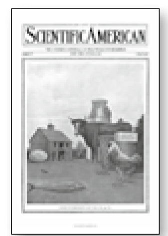
Junio 1963

El primer exoplaneta

«Se ha descubierto un “compañero oscuro”, del tamaño de un planeta, que gira en torno a una estrella tenue a una distancia de seis años luz en dirección a la constelación de Ofiuco. El “sol” de ese sistema solar es la estrella de Barnard, más conocida también porque su movimiento de un lado a otro del firmamento representa el más amplio de todas las estrellas. La masa de ese planeta supera en un 50 por ciento a la de Júpiter; su descubridor, Peter van de Kamp, del Colegio Swarthmore, le ha dado el nombre de estrella de Barnard B. Señala Van Kamp que, aunque la estrella de Barnad y su compañero forman el tercero de los sistemas planetarios conocidos exteriores al nuestro, ambos objetos constituyen la primera pareja de este tipo en que el compañero resulta lo bastante pequeño para que podamos clasificarlo sin lugar a dudas como planeta.»

Después de Babel

«La traducción mecánica del chino parecería ofrecer la única esperanza realista de proporcionar a Occidente un acceso fácil a los hábitos, logros y aspiraciones de una cuarta parte de la humanidad. El conjunto de países indochinos, con una población de unos 750 millones, publican en la actualidad unos tres mil millones de palabras al año en diarios, revistas y libros. De tan vasta producción hoy se traduce y se reedita en inglés, francés y alemán menos del uno por ciento (sin duda el porcentaje de las traducciones al ruso es superior). La traducción automática resulta necesaria porque los traductores humanos no pueden abarcar ese volumen ni esperar adquirir todo el vocabulario técnico especializado de interés.»



Junio 1913

Comunicaciones submarinas

«El Departamento de la Armada ha adoptado un “violín submarino” para la transmisión de mensajes entre torpederas submarinas y bases costeras u otras embarcaciones. Su mecanismo es una adaptación del violín. De un costado del submarino sobresalen dos puntales de acero. Desde los extremos de estos puntales se tiende un alambre tenso a modo de cuerda de piano. En contacto con el alambre se mantiene una llanta de rueda rugosa, la cual, cuando gira, hace vibrar el alambre. Con un pulsador Morse ordinario se introducen puntos y rayas en el alambre. Los experimentos efectuados en Hampton Roads (Virginia) mostraron que las vibraciones se oyen perfectamente a una distancia de cinco millas.»

Paracaídas que fallan

«Que los paracaídas no ofrecen la protección absoluta en los accidentes potencialmente mortales lo demuestra la terrible experiencia de Arthur Lapham en la exhibición de vuelo de la Sociedad Aeronáutica en Staten Island. Con la bolsa Stevens (por Albert Stevens, inventor de paracaídas) a la espalda, Lapham iba a lanzarse desde un biplano Wright que iba a volar a unos 1600 metros de altitud. Desde una altura que algunos espectadores estiman en unos cien metros, Lapham se escurrió del asiento y cayó a tierra. El paracaídas no se abrió probablemente porque la altura era demasiado baja. Por suerte, Lapham aterrizó ileso en la zona pantanosa salina contigua a la bahía de Prince.»



Junio 1863

Cámara sin filme

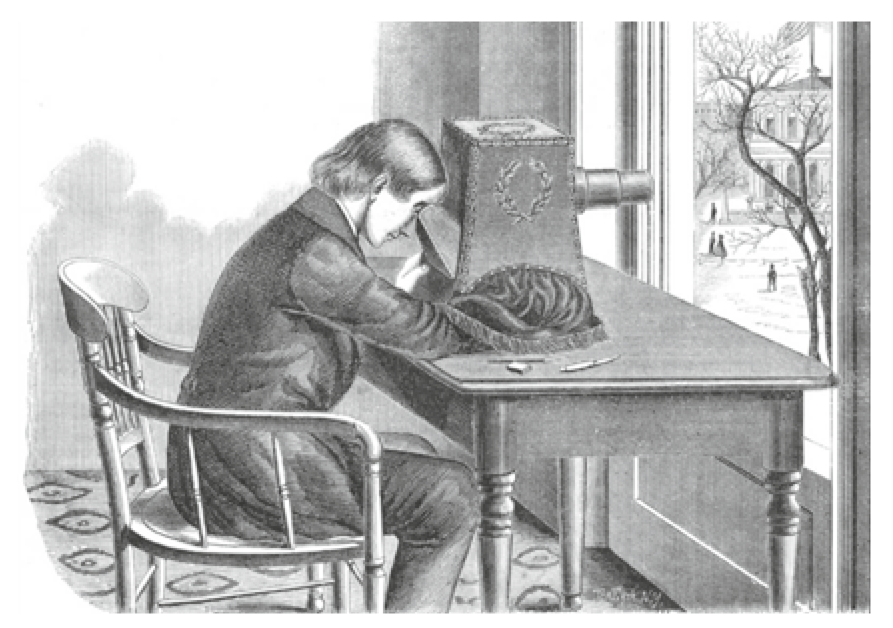
«En la “cámara oscura” hallamos una valiosa ayuda para el ejercicio artístico de las manos y la vista. El objeto que se desea reproducir es reflejado a través de la lente sobre los espejos y luego sobre el papel blanco o el lienzo situado debajo (donde puede calcarse o dibujarse). El artista introduce la mano por la abertura lateral protegida por la cortinilla. En el modelo recién patentado se combinan las características deseables con una apariencia externa elegante. En la ilustración se muestra una perspectiva del instrumento con un estudiante que está dibujando el ayuntamiento de Nueva York.»

Fuerza animal

«Se dice que los experimentos sobre navegación a vapor en el canal Erie han resultado insatisfactorios. Una empresa ha retirado los motores de sus embarcaciones y las ha convertido en barcazas remolcadas por caballos.»

Fuerza humana

«El peonaje escasea tanto en Michigan que en algunas localidades se ha obligado a las mujeres a laborar en los campos. Los salarios son altos.»



Cámara oscura: **El instrumento proyectaba una imagen sobre papel o lienzo, donde el artista podía calcarla o pintarla, 1863.**

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. VIII, N.º 23, 6 DE JUNIO DE 1863




NEUROCIENCIA

Gérmenes de la demencia

Lary C. Walker y Mathias Jucker

Una reacción en cadena de proteínas tóxicas podría explicar el alzhéimer, el párkinson y otros trastornos mortales.

PLANETAS

Marte en movimiento

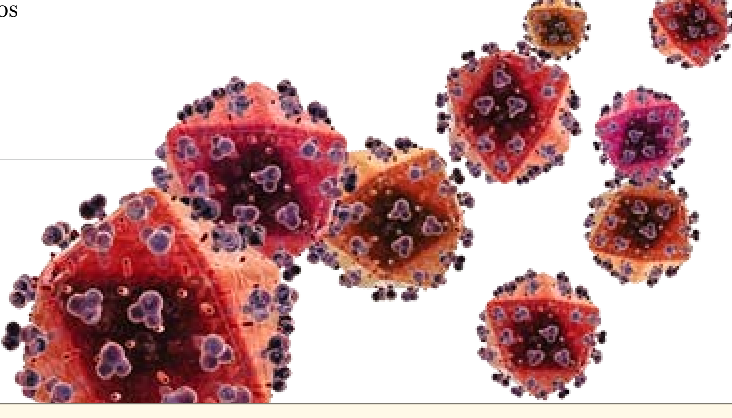
Alfred S. McEwen

La superficie de Marte cambia continuamente. ¿Podría deberse a la acción de corrientes de agua?

SELECCIÓN HISTÓRICA

Química de nóbel

El 63º encuentro entre jóvenes investigadores y premios Nobel tendrá lugar en Lindau a comienzos de julio. Lo celebramos con la reedición de una serie de textos publicados en Investigación y Ciencia por algunos de los laureados.



INFORME ESPECIAL: SIDA

La respuesta inmunitaria al VIH

Nina Bhardwaj, Florian Hladik y Susan Moir

Curar la infección por el VIH

Javier Martínez Picado

Evolución del sida en España

Mercedes Diez Ruiz-Navarro y Asunción Díaz Franco

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Tomás Ortín: *Mensajeros fantasmales de nueva física*; Alberto Ramos: *Información y significado y Hacia una teoría universal*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Luis Bou: *Ornitología participativa y Foro científico*; M.ª Rosa Vallès: *Ciencia y gastronomía*; José Manuel Vidal Donet: *Avances en medicina regenerativa*; Juan P. Adrados: *Investigación espacial de bajo coste*; Luis Cardona: *Reservas marinas y población local*; Carlos Lorenzo: *El apareamiento en los dinosaurios*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España